

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Analýza měření odchylky kruhovitosti na optickém měřicím zařízení

Measurement Analysis of Roundness Deviation on Optical
Measuring Device

Student:

Bc. Lenka Otrusinová

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Lenka Čepová, PhD.

Ostrava 2010

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lenka Otrusinová**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: **Analýza měření odchylky kruhovitosti na optickém měřicím zařízení**
Measurement Analysis of Roundness Deviation on Optical Measuring Device

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Současný stav řešené problematiky.
3. Experimentální zkoušky.
4. Vyhodnocení experimentů.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:


ADAMCZAK, S. *Odniesieniowe metody pomiaru okragłości części maszyn*. Kielce: Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 1998. 181 s. PL ISSN 0239-4979.
OČENÁŠOVÁ, L. *Príspevok k hodnoteniu odchýlky kruhovitosti pri meraní na súradnicovom meracom stroji*. Žilinská univerzita v Žiline – Strojnícka fakulta: Dizertačná práca, 2008.
PERNIKÁŘ, J., TYKAL, M., VAČKÁŘ, J. *Jakost a metrologie, Část metrologie*. Brno: VUT v Brne, 2004. 151 s. ISBN 80-214-1997-0.
CHRISTOPH, R., NEUMANN, H. J. *Multisenzorová souřadnicová měřicí technika*. Uherské Hradiště: L. V. Print Uherské Hradiště – sv corporate media, D-80992 München, 2008. 106 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lenka Čepová, Ph.D.**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010


prof. Dr. Ing. Josef Brychta
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 18.5.2010

Lenka Okusínová
.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byla seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 18.5.2010

Lenka Otrusinová

.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Lenka Otrusinová

Adresa trvalého pobytu autora práce: Boršice 523, 687 09 Boršice

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

OTRUSINOVÁ, L. Analýza měření odchylky kruhovitosti na optickém měřicím zařízení : diplomová práce. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2010, 63 s. Vedoucí práce: Čepová, L.

Diplomová práce se zabývá měřením úchylky kruhovitosti jak na optických měřicích zařízeních, tak i na přístrojích měřících dotykovou metodou. Úvodní část je věnována tématu principu měření optických i dotykových měřicích zařízení a popisuje používané druhy senzorů všech zařízení. V experimentální části byly všechny naměřené hodnoty úchylky kruhovitosti porovnány, zpracovány statisticky i graficky. Na základě měření a následného vyhodnocení bylo zjištěno, že optické přístroje jsou schopny naměřit menší hodnotu úchylky kruhovitosti s porovnáním při měření přístroji dotykovými.

OTRUSINOVÁ, L. Measurement Analysis of Roundness Deviation on Optical Measuring Device : Master Thesis. Ostrava : VŠB-Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of machining and assembly, 2010, Thesis head: Čepová, L.

Master thesis deals with measuring the roundness deviations at the optical measuring devices and devices for measuring for contact method. In introduction is topic of the measuring principle of optical and contact measuring devices and describes the types of sensors used in all devices. In the experimental part, all roundness deviations measured values were compared, statistically and graphically processed. On base of measurements and following evaluations were found, that the optical devices are able for smaller measured roundness deviation with comparing of the deviations for contact device.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1. PŘEHLED ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY KRUHOVITOSTI	12
1.1 Geometrické tolerance	12
1.2 Geometrické odchylky.....	14
1.2.1 Odchylky tvaru	14
1.2.2 Všeobecné termíny a definice dle normy ČSN P ISO/TS 12181-1	14
1.2.3 Normy vztahující se ke kruhovitosti	17
2. ÚCHYLKA KRUHOVITOSTI	18
2.1 Matematický popis profilu kruhovitosti a jeho hodnocení.....	19
2.1.1 Harmonická analýza profilu kruhovitosti	19
2.1.2 Parametry hodnocení úchyly kruhovitosti	21
2.2 Metody měření úchyly kruhovitosti	22
2.2.1 Opticko dotyková měřicí technika.....	22
2.2.2 Konstrukce strojů a principy měření	23
2.2.3 Souřadnicové měřicí stroje s křížovým stolem.....	23
2.2.4 Souřadnicové měřicí stroje s portálem	24
2.3 Senzory pro souřadnicové měřicí stroje.....	24
2.3.1 Vizuální senzory.....	25
2.3.2 Hranový senzor	26
2.3.3 Senzor zpracování obrazu	26
2.3.4 Senzory měřicí vzdálenost	26
2.3.5 Laserové bodové senzory	27
2.3.6 Dotykové senzory	27
2.3.7 Měřicí dotykově optický senzor	28
2.4 Podmínky přesného měření.....	29
2.5 Chyby a nejistoty měření	29
2.5.1 Chyby měření.....	29
2.5.2 Nejistoty měření	31

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	33
3.1 Měření součástky dotykovou metodou na přístroji DEA Global – IMAGE clima	34
3.1.1 Měření vnitřního průměru	35
3.1.2 Měření vnějšího průměru	36
3.1.3 Grafické vyhodnocení měřených hodnot dotykovou metodou na přístroji DEA Global – IMAGE clima	37
3.1.4 Zhodnocení měření úchylky kruhovitosti na přístroji DEA Global-IMAGE clima	40
3.2 Měření součástky pomocí skenování na přístroji DEA Global - IMAGE clima	41
3.2.1 Měření skenováním vnitřního průměru s použitím filtru	42
3.2.2 Měření skenováním vnějšího průměru s použitím filtru.....	43
3.2.3 Grafické vyhodnocení naměřených hodnot úchylky kruhovitosti metodou skenování na přístroji Dea Global – IMAGE clima	44
3.2.4 Zhodnocení měření skenovací metodou	47
3.3 Měření součásti dotykovou metodou na přístroji Hommel Roundscan 435	47
3.3.1 Měření součásti na přístroji Hommel Roundscan 435 – dotyková metoda	49
3.3.2 Grafické vyhodnocení měřené součásti na přístroji Hommel Roundscan 435	50
3.3.3 Zhodnocení měření dotykovou metodu na přístroji Hommel Roundscan 435	52
3.4 Měření na optickém přístroji - digitální skener Atos GOM II.	52
3.4.1 Systém měření a vyhodnocování měřených dat u přístroje Atos GOM II... <i>Proces měření - rychlé měření s vysokou hustotou dat,</i>	52
3.4.2 Vyhodnocení naměřených hodnot úchylky kruhovitosti na přístroji Atos GOM II.	53
3.4.3 Grafické vyhodnocení při měření na přístroji Atos GOM II.....	54
3.4.4 Vyhodnocení měření na optickém přístroji Atos GOM II.	54
3.5 Měření na optickém přístroji Werth VideoCheck IP.....	54
3.5.1 Vyhodnocení naměřených hodnot úchylek kruhovitosti na optickém přístroji Werth VideoCheck IP.....	56

3.5.2	Grafické vyhodnocení měřených hodnot úchylek kruhovitosti na optickém přístroji Werth VideoCheck IP.....	57
3.5.3	Vyhodnocení naměřených hodnot úchyly kruhovitosti na optickém přístroji Werth VideoCheck IP.....	58
4.	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	59
	ZÁVĚR	60
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	62
	SEZNAM PŘÍLOH.....	64

Seznam použitých značek a symbolů

A	referenční kružnice	
A_1, A_2	soustředné kružnice	
C_1, C_2	středů kružnic A_1, A_2	
CMM	souřadnicové měřicí zařízení	
H_2, H_n	normované hodnoty	
$MCCI$	nejmenší opsaná kružnice	
$MICI$	největší vepsaná kružnice	
MPE_E	největší dovolená chyba stroje CMM při měření rozměru	[μm]
MPE_P	největší dovolená chyba snímání	[μm]
$MZCI$	nejmenší pásmo – mezikruží	
$LSCI$	střední kružnice nejmenších čtverců	
R_{max}	maximální poloměr	[mm]
R_{min}	minimální poloměr	[mm]
R_0	poloměr střední kružnice	[mm]
$R(\varphi)$	funkce vzdálenosti	
a	x-ová souřadnice excentricity	[mm]
b	y-ová souřadnice excentricity	[mm]
b	bod	
a_h	x-ová souřadnice harmonické složky	[mm]
a_1	kladná místní úchylka	
a_2	záporná místní úchylka	
b_h	y-ová souřadnice harmonické složky	[mm]
c_0	jednosměrná složka	[°]
c_h	amplitudy jednotlivých harmonických složek	[mm]
h	číslo harmonické složky	
n	je rozsah výběru, počet ekvidistantních poloměrů	
p	pravděpodobnost	
r_i	jednotlivé poloměry	[mm]
r	poloměr	[mm]
$r(\varphi)$	poloměr vypočítané závislosti	[mm]
u_A	standardní nejistota typu A	
u_B	standardní nejistota typu B	
u_C	standardní nejistota typu C	
$s(x)$	výběrová směrodatná odchylka	
x_i	naměřená hodnota	

\bar{x}	střední hodnota	
Δ	úchylka tvaru skutečné plochy od tvaru jmenovité plochy	[μm]
$\Delta r_1, \Delta r_2$	radiální vzdálenosti pro A_1, A_2	[mm]
ΔZ	úchylka kruhovitosti	[mm]
$\Delta \bar{Z}$	aritmetický průměr úchylky kruhovitosti	[mm]
φ	úhel natočení	[$^\circ$]
ψ_1	fázové posunutí excentricity	[$^\circ$]
ΔZ_q	střední kružnice nejmenších čtverců	
ΔZ_c	nejmenší opsaná kružnice	
ΔZ_i	největší vepsaná kružnice	
ΔZ_z	nejmenší pásmo - mezikruží	

Úvod

V rychle se rozvíjejícím strojírenství jsou kladeny vysoké požadavky na kvalitu a přesnost zvláště pak při výrobě rotačních součástí.

Jednou ze základních tolerancí definovanou pro geometrickou přesnost je úchylka kruhovitosti, která je velmi sledovaným parametrem u rotačních součástí, zvláště pak při výrobě valivých ložisek. Na měření úchylky kruhovitosti se používají různé měřicí metody a měřicí přístroje či zařízení, od univerzálních až po velmi přesné měřicí přístroje. Avšak v poslední době hrají nezastupitelnou roli optické měřicí přístroje a dostávají se tak do popředí díky podstatně zjednodušenému postupu měření, urychlení práce při měření a velkým možnostem uchování získaných dat. Diplomová práce se zabývá nejen měřením úchylky kruhovitosti na opticky měřicích přístrojích, ale také samotným principem optických přístrojů a zařízení.

I když se v dnešní době stále více prosazuje optické měření nad dotykovým měřením, stále však dotykové měření hraje významnou roli ve firmách. Proto v experimentální části byly měřeny úchylky kruhovitosti jak na přístrojích měřicích dotykovou metodou, tak na přístrojích optických. Hodnoty těchto měření nám poté umožnily jejich vzájemné porovnání a statistické vyhodnocení.

Vzhledem k tomu, že současné platné normy používají název úchylka kruhovitosti, proto je tento výraz nadále používán v celém textu.

1. Přehled řešení problematiky kruhovitosti

Aby strojní součásti mohly plnit svoji funkci, vyžadují se nejen přesné rozměry ploch, ale také správnost geometrického tvaru vzájemné polohy ploch a směru. Všechny povrchy obrobků se skládají z určitých geometrických prvků. Vyráběné součásti však kvůli působení celé řady vlivů při výrobním procesu, vykazují určité odchylky od ideálního geometrického tvaru.

Z metrologického hlediska nepřesnost strojních součástí představuje odchylky skutečné povrchové plochy od plochy geometrické. Geometrická plocha, tj. jmenovitá plocha určená předepsanými rozměry.

Skutečná povrchová plocha součásti vzniká v průběhu výroby. Takto vzniklá plocha je pak popisována na základě odchylek od jednotlivých ploch [23].

Definované odchylky:












- odchylky od jmenovitých rozměrů jsou definované na základě mezních rozměrů,
- odchylky od geometrického tvaru jsou definované jako největší naměřená vzdálenost od vrcholů drsnosti skutečné plochy k obalové ploše,
- odchylky vzájemné polohy je vzájemná poloha obalové a jmenovité plochy,
- drsnost povrchu je souhrn nerovností skutečného povrchu s poměrně malým rozestupem, které se vyhodnocují od vztažné čáry na určité vzdálenosti.

1.1 Geometrické tolerance

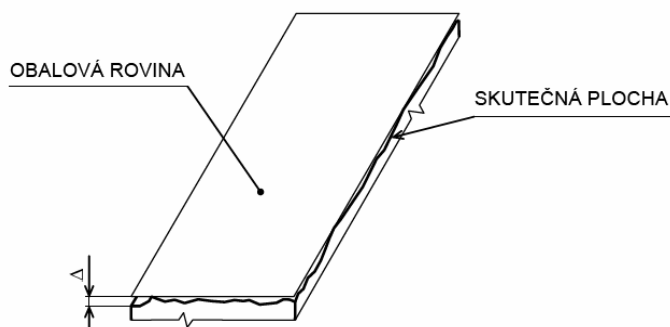
Skutečné plochy vykazují určité odchylky vzhledem k jmenovitým hodnotám. Norma ČSN EN ISO 1101 říká, že *geometrická tolerance* je definovaná jako toleranční pole, ve kterém se musí nacházet skutečný prvek součásti [1].

Základní tolerance definované pro geometrickou přesnost dle normy ČSN EN ISO 1101 jsou uvedeny v tabulce č. 1 – Značky pro úchylky tvaru a polohy.

Tab. 1 - Značky pro úchytky tvaru a polohy [2]

tolerance tvaru	tolerance přímosti	—
	tolerance rovinnosti	
	tolerance kruhovitosti	
	tolerance válcovitosti	
	tolerance profilu podélného řezu	=
tolerance polohy	tolerance rovnoběžnosti	//
	tolerance kolmosti	
	tolerance sklonu	
	tolerance souososti	
	tolerance souměrnosti	
	tolerance jmenovité polohy prvku	
	tolerance různoběžnosti os	×
souhrnné tolerance tvaru a polohy	tolerance obvodového házení	
	tolerance čelního házení	
	tolerance házení v daném směru	
	tolerance úplného obvodového házení	
	tolerance úplného čelního házení	
	tolerance tvaru daného profilu	
	tolerance tvaru dané plochy	

„Mezní úchytky rozměrů se předepisují k přesným geometrickým tvarům součástí. Skutečně vyrobené součásti však nemají přesný geometrický tvar, stejně jako nemají absolutně přesné rozměry. Proto je třeba tolerovat i geometrický tvar a polohu ploch součástí. [2]“



Obr. 1 – Obalová a skutečná plocha [2]

„Skutečná plocha - plocha ohraničující součást a odděluje ji od okolního prostředí.

Jmenovitá plocha - ideální plocha, jejíž jmenovitý tvar je určen výkresem nebo jinou technickou dokumentací.

Obalová plocha - má tvar jmenovité plochy, dotýká se skutečné plochy, leží vně materiálu součásti.

„Úchylka tvaru skutečné plochy od tvaru jmenovité plochy (Δ) - vyjadřuje největší vzdálenost bodů skutečné plochy od obalové plochy ve směru normály k obalové ploše. [2]“

Tolerance tvaru - největší dovolená hodnota úchylky tvaru.

Úchylky polohy - vzdálenosti vyjadřující polohu posuzované plochy nebo čáry vzhledem k její jmenovité poloze, která se určí jmenovitými délkovými příp. úhlovými rozměry vzhledem ke zvoleným základnám [2].“

1.2 Geometrické odchylky

Geometrické odchylky jsou výsledkem nepřesnosti procesu výroby a musí být měřeny a kontrolovány [1].

1.2.1 Odchylky tvaru

„Odchylka geometrického tvaru je hodnota vychýlení skutečného profilu součásti od jeho jmenovitého profilu. Odchylka geometrického tvaru je stanovena minimální z maximálních vzdáleností hodnoceného prvku od obalového prvku [3].“

Na funkční rotační plochy jsou kladeny vysoké nároky na tvarovou přesnost. Z tohoto důvodu je mimořádně dožité hodnocení kruhovitosti [4].

1.2.2 Všeobecné termíny a definice dle normy ČSN P ISO/TS 12181-1

Všeobecné termíny:

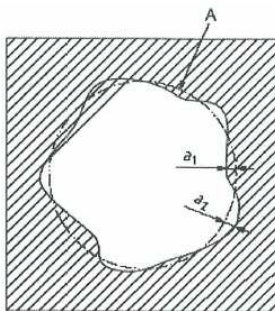
kruhovitost – vlastnost kružnice,

osa kruhovitosti – osa prvku přiřazeného k integrálnímu prvku,

rovina kruhovitosti – rovina kolmá k ose otáčení v celém rozsahu prvku.

Termíny vztahující se k profilům:

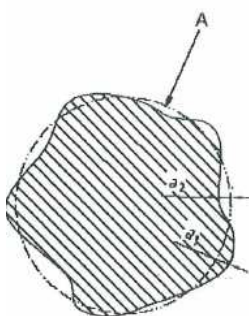
- *profil kruhovitosti* – zjištěná obvodová čára úmyslně modifikovaná filtrem,
- *skutečný povrch součásti* – integrální prvek jako část skutečného povrchu součásti omezený přilehlými skutečnými (integrálními) prvky,
- *zjištěná obvodová čára* – (kruhovitost) digitální reprezentace průsečnice skutečného povrchu a roviny kruhovitosti,
- *místní úchylka kruhovitosti LRD* – minimální vzdálenost od bodu na kruhovém profilu k referenční kružnici.



Obr. 2 - Místní úchylka tvaru vnitřního kruhového prvku [3]

Legenda

- A referenční kružnice
 a_1 kladná místní úchylka
 a_2 záporná místní úchylka



Obr. 3 – Místní úchylka tvaru vnějšího kruhového prvku [3]

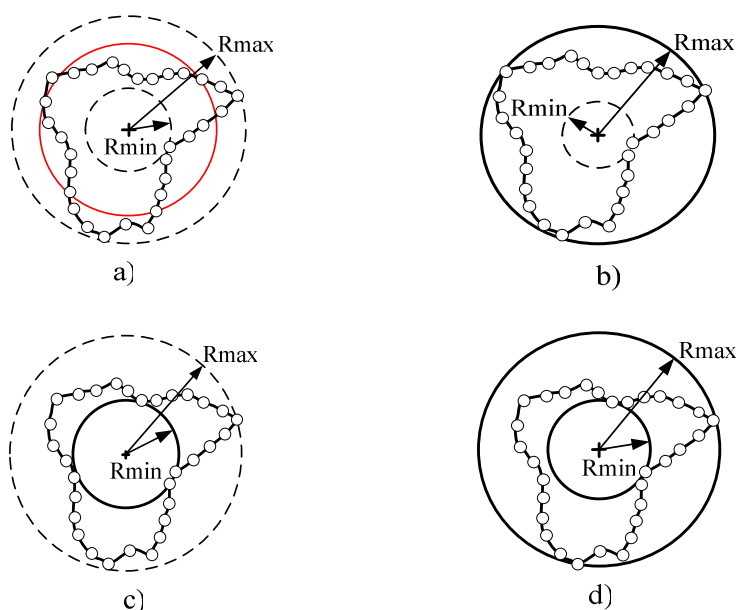
Legenda

- A referenční kružnice
 a_1 kladná místní úchylka
 a_2 záporná místní úchylka

Termíny vztahující se k referenční kružnici:

- *referenční kružnice* – přiřazená kružnice umístěná k profilu kruhovitosti podle specifických konvencí, k níž se vztahují úchylky kruhovitosti a parametry kruhovitosti [3],
- *referenční kružnice nejmenší zóny MZCI (minimum zone circles)* – dvě soustředné kružnice vymezující kruhový profil a umístěné v nejmenší kolmé vzdálenosti (od sebe) [3].,
- *referenční kružnice nejmenších čtverců LSCI (last squares mean circle)* – kružnice pro niž je součet čtverců místních úchylek kruhovitosti nejmenší,
- *nejmenší opsaná referenční kružnice MCCI (minimum circumscribed circle)* – nejmenší možná kružnice, která může být umístěna vně profilu kruhovitosti,
- *největší opsaná referenční kružnice MICI (maximum inscribed circle)* – největší možná kružnice, která může být umístěna uvnitř profilu kruhovitosti,

- *přiřazený odvozený střed* – střed referenční kružnice,
- *vnější referenční kružnice nejmenší zóny* – vnější kružnice nejmenší zóny referenčních kružnic,
- *vnitřní referenční kružnice nejmenší zóny* – vnitřní kružnice nejmenší zóny referenčních kružnic,
- *střední referenční kružnice nejmenší zóny* – aritmetická střední kružnice nejmenší zóny referenčních kružnic [3].



Obr. 4 - Referenční kružnice [7]

Tab. 2 – Význam označení [7]

Označení	Střed referenční kružnice		
ΔZ_q	střední kružnice nejmenších čtverců	a)	LSCI
ΔZ_c	nejmenší opsaná kružnice	b)	MCCI
ΔZ_i	největší vepsaná kružnice	c)	MICI
ΔZ_z	nejmenší pásmo - mezikruží	d)	MZCI

Všeobecné parametry:

- *úchylka kruhovitosti od výstupku k prohlubni* – hodnota největší kladné místní úchylky kruhovitosti přidaná k absolutní hodnotě největší záporné místní úchylky kruhovitosti,
- *úchylka kruhovitosti od výstupku k referenční kružnici* – hodnota největší kladné místní úchylky kruhovitosti od referenční kružnice nejmenších čtverců,

- *úchylka kruhovitosti od referenční kružnice k prohlubni* – absolutní hodnota největší záporné místní úchylky kruhovitosti od referenční kružnice nejmenších čtverců,
- *střední kvadratická úchylka kruhovitosti* – druhá odmocnina součtu čtverců místních úchylek kruhovitosti od referenční kružnice nejmenších čtverců [3].

1.2.3 Normy vztahující se ke kruhovitosti

ČSN ISO 4292 – Metody hodnocení úchylek kruhovitosti; Měření dvou a tříbodovou metodou.

ČSN P ISO/TS 12181-1 – Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Kruhovitost – Část 1: Slovník a parametry kruhovitosti.

ČSN P ISO/TS 12181 – 2 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Kruhovitost – Část 2: Operátory specifikace.

ČSN ISO 4291 – Metody hodnocení úchylek kruhovitosti; Měření změn poloměru.

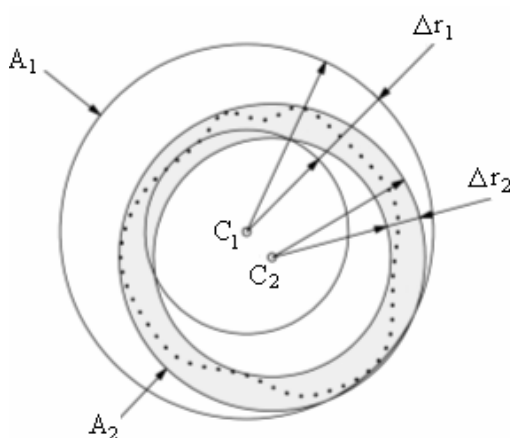
2. Úchylka kruhovitosti

Kruhové tvary funkčních povrchů patří k základním prvkům strojních součástí. Objevují se především u hřídelí a valivých ložisek. Z hlediska funkce součástí je kontrola přesnosti tvaru – kruhovitosti velmi důležitá.

Aby byla zajištěna spolehlivá funkce povrchu, hraje kontrola kruhovitosti významnou roli. Nepřesnost kruhových tvarů může mít za následek např. zvýšenou hlučnost i poruchy funkčnosti [6].

Úchylka kruhovitosti ΔZ – největší vzdálenost bodů skutečného profilu, je součtem rozměrů největšího výstupku a největší prohlubně profilu [5].

Kruhovitost jednotlivého tolerovaného prvku se považuje za správnou, když je prvek ohraničený dvěma soustřednými kružnicemi, jejichž radiální vzdálenost se rovná předepsané hodnotě tolerance anebo menší. Umístění středů kružnic a velikost jejich poloměrů se musí zvolit tak, aby radiální vzdálenost mezi dvěma soustřednými kružnicemi byla co nejmenší [7].



Obr. 5 – Hodnota minimální zóny pro kružnice [7]

Z obrázku vyplývá správná tolerance podmínky $\Delta r_1 < \Delta r_2$.

Možné umístění středů dvou soustředných kružnic a jejich nejmenší radiální vzdálenost:

- Střed C_1 pro případ A_1 určuje polohu soustředných kružnic, kde radiální vzdálenost mezi nimi je Δr_1 [7].
- Střed C_2 pro případ A_2 určuje polohu soustředných kružnic, kde radiální vzdálenost mezi nimi je Δr_2 .

Správná podmínka dvou soustředných kružnic je ta, která je označena A_2 . Radiální vzdálenost Δr_2 se rovná předepsané toleranci kruhovitosti, anebo je menší [7].

2.1 Matematický popis profilu kruhovitosti a jeho hodnocení

Přesná analýza chyby vyžaduje specifické měřicí metody s následným matematickým zpracováním naměřených hodnot. Jednou z možných metod je opis profilu kruhovitosti Furierovým řádem, který umožňuje vyjádření jednotlivých harmonických složek. Současně umožňuje nejen posouzení tvaru kruhovitosti, ale i funkčnosti a zpětnou vazbu pro technologa při posuzování a zlepšování technologického procesu [5].

2.1.1 Harmonická analýza profilu kruhovitosti

Harmonická analýza je jedna z vhodných metod, která umožňuje rozklad snímaného profilu na jednotlivé harmonické složky. Pro libovolný profil kruhovitosti ji je možné opsat v polární souřadnicové soustavě jako závislost okamžité polohy poloměru r a úhlu φ polohy tohoto poloměru.

Pokud máme n ekvidistantních poloměrů po obvodě, můžeme vypočítat $h=n/2$ harmonických složek a jejich úhel fázového posunutí φ . Přes profil překládáme funkci, jejíž vyjádření je ve tvaru (1) [5].

$$r(\varphi) = c_0 + c_1 \cdot \sin(\varphi + \psi_1) + c_2 \cdot \sin(2\varphi + \psi_2) + \dots + c_h \cdot \sin(h\varphi + \psi_h) \quad (1)$$

kde:	$r(\varphi)$	poloměr vypočítané závislosti	[mm]
	φ	úhel svírající průvodič s osou x	[°]
	c_0	jednosměrná složka	[°]
	c_h	amplitudy jednotlivých harmonických složek	[mm]
	h	číslo harmonické složky.	

Nejjednodušší výpočet je podle Besselových vzorců. Poloměr kružnice přeložené metodou nejmenších čtverců se vypočítá podle vzorce (2).

X – ovou souřadnici harmonické složky se vypočítá podle vztahu (3) a Y – ová souřadnice harmonické složky se vypočítá podle vztahu (4). Amplitudy jednotlivých harmonických složek vypočítáme podle vztahu (5) [5].

Fázové posunutí pro jednotlivé harmonické složky pak podle vztahu (6) [5].

$$c_0 = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n} \quad (2)$$

$$a_h = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} r_i \cdot \cos \frac{360}{n} h.i \quad (3)$$

$$b_h = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} r_i \cdot \sin \frac{360}{n} h.i \quad (4)$$

$$c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad (5)$$

$$\psi_h = \arctg \frac{a_h}{b_h} \quad (6)$$

kde:	r_i	jednotlivé poloměry $i=1, 2, 3, \dots n$	[mm]
	n	počet ekvidistančních poloměrů	
	a_h	x-ová souřadnice harmonické složky	[mm]
	b_h	y-ová souřadnice harmonické složky	[mm].

Harmonická analýza má hodně výhod, které se dají velmi dobře využít. První harmonická složka c_1 je excentricita. Je oproti ose x pootočená o úhel Ψ_1 . Z ní je snadné vypočítat souřadnice a, b (7). Pro centrování stačí vypočítat jen první harmonickou složku [5].

$$a = c_1 \cos \psi_1 \quad (7)$$

$$b = c_1 \sin \psi_1$$

kde:	a	x-ová souřadnice excentricity	[mm]
	b	y-ová souřadnice excentricity	[mm]
	Ψ_1	fázové posunutí excentricity	[°]

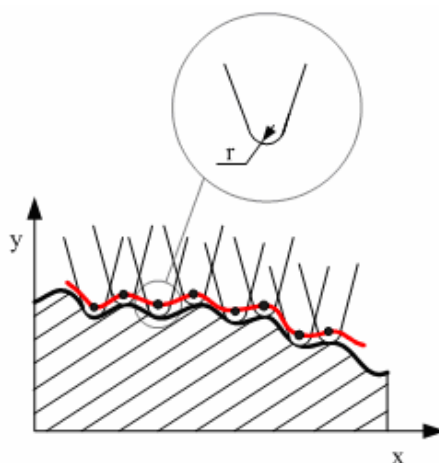
Pro některé méně náročné měření je vhodné vynechat první harmonickou složku a tím centrovat záznam. Pro číselné vyjádření úchylek kruhovitosti je nutné vypočítat rozdíl mezi maximálním a minimálním poloměrem. Údaj je jednoznačně vyjádřený číslem. Omyl je prakticky vyloučený [7].

2.1.2 Parametry hodnocení úchytky kruhovitosti

„Úchytky kruhovitosti jsou měřeny v rovinách kolmých na osu kontrolované rotační plochy. Norma stanovuje nejmenší počet měření a poloha rovin měření v závislosti na délce válcové plochy a poměru délky a průměru [4].“

Rotační funkční plochy jsou významné díky jejich četnosti a z hlediska požadavků na geometrickou jakost. Geometrická jakost zde rovněž zahrnuje *kruhovitosť* a složky *struktury povrchu* – *vlnitost povrchu* a *drsňost povrchu*.

Vlnitost povrchu bývá do kruhovitosti zahrnuta anebo filtrací eliminována. *Drsnost povrchu* se po obvodu nezjišťuje – jedná se o složku podélnou. Přesnost metody závisí od tvaru dotyku na snímaném profilu, který vykresluje dráhu dotyku snímače [5].



Obr. 6 – Příklad snímaného profilu na konvenční přístroji spojitou metodou; r – poloměr [7]

„Pro hodnocení kruhovitosti je všeobecně potřebné získat profil rotační součástky v rovině kolmé na jeho osu (skutečný profil) a tento profil porovnat s kružnicí (ideální profil), jejíž polohu vůči posuzovanému profilu je potřebné určit podle dohodnutých pravidel. Úchytka kruhovitosti je pak prezentována jako radiální velikost nesouhlasu obou profilů [4].“

Pro získání číselných hodnot úchytek kruhovitosti je třeba provést řadu kroků, z nichž každý určitým způsobem ovlivní jejich přesnost.

Mezi základní kroky patří [4]:

- *zavedení a definování pojmů* k vyjádření kruhovitosti,
- *stanovení kritérií* pro hodnocení kruhovitosti,
- *získání informací* z povrchu měřeného rotačního objektu. Získání informací z povrchu měřeného objektu lze realizovat spojitým nebo diskrétním snímáním.

Při diskrétním způsobu snímání lze využít dvoubodovou nebo třibodovou metodu (uvádí norma ČSN ISO 4292), nebo odměřování souřadnic omezeného počtu bodů z obvodu pomocí souřadnicového měřicího stroje.

- *zpracování signálu* nesoucího informace,
- *vyhodnocení a interpretace* výsledku měření [4].

2.2 Metody měření úchylky kruhovitosti

„K měření úchylek kruhovitosti se používají různé měřicí metody a různé měřicí přístroje a zařízení, od univerzálních – tj. měření v prisma až po velmi přesné přístroje. V poslední době nastal velký pokrok ve vývoji trísouřadnicových měřicích přístrojích (dále jen CMM). Umožňují současné měření kruhovitosti, avšak nezaručují malou nejistotu měření, jakou může zajistit měření na speciálním měřicím zařízení. CMM stroje se mohou používat při měření profilu kruhovitosti od odchylky větší než 10 μm .

Výhodou souřadnicových měřicích strojů je jejich univerzálnost, jako je například hodnocení odchylky tvaru, průměru a polohy kružnic [7].“

Měřicí metody měření úchylky kruhovitosti pro různé měřicí přístroje a zařízení můžeme dělit na:

- spojité metody
- nespojité metody – diskrétní metody

Volba metody měření kruhovitosti bývá ovlivněna požadovanou přesností, rozsahem kontroly i náklady na samotné měření.

Stále více se prosazují požadavky na vysokou přesnost kontroly kruhovitosti. Zajištění takových požadavků vyžaduje vesměs použití jednoúčelových měřidel [6].

Vysoké přesnosti součástí odpovídá tolerance kruhovitosti v rozsahu 0,1 μm až 1 μm .

2.2.1 Opticko dotyková měřicí technika

Souřadnicová měřicí technika díky své všestrannosti dosahuje vysokého významu a postupně tak nahrazuje jednoúčelové měřicí stroje.

Předpokladem pro optickou souřadnicovou měřicí techniku jsou metody zpracování obrazu a laserové senzory. Multisenzorové souřadnicové měřicí stroje jsou vybaveny dotykovými i optoelektronickými senzory a mohou tedy měřit dotykovou i optickou metodou. Optoelektrické senzory nabývají velkého významu kvůli vzrůstající

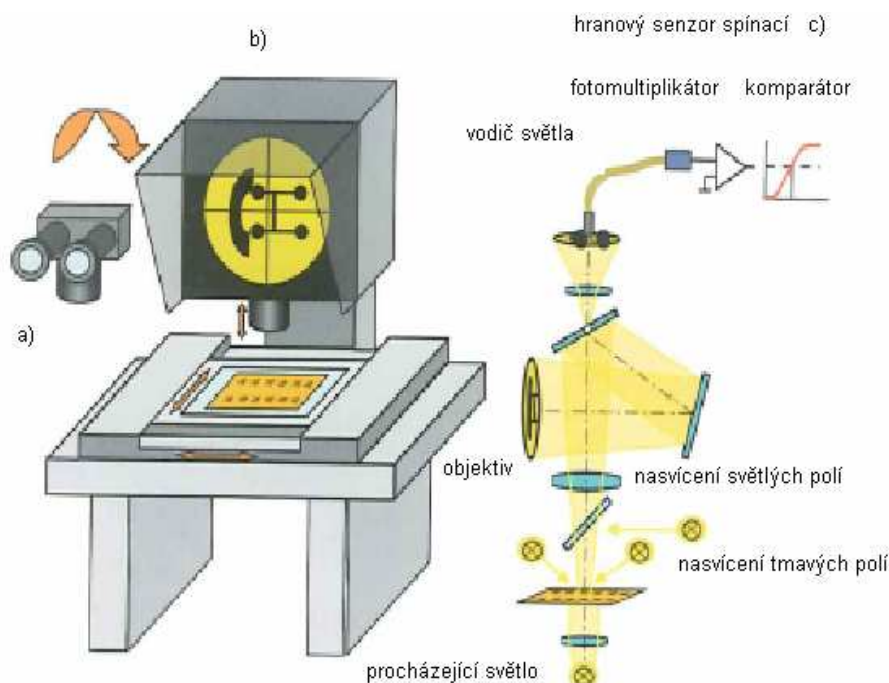
náročnosti tvarů a velikostí dílců. Multisenzorová měřicí technika je díky své vysoké rychlosti měření hospodárná ve výrobě [8].

2.2.2 Konstrukce strojů a principy měření

Pomocí souřadnicových měřicích strojů lze měřit geometrické prvky jako jsou délka, úhel, sklon a rovnoběžnost.

Souřadnicové osy měřicích zařízení mívají ve většině případů kartézské uspořádání. Pohyb měřicího suportu v osách umožňuje pohon motoru anebo je realizován ručně. Na jedné z os, většinou a svislé ose Z (pinola), je umístěn senzor ke snímání měřených bodů.

Prvním optoelektrickým senzorem byl tzv. „hranový senzor“ pro měřicí projektory, který umožňuje automatické snímání bodů objektu[8].“



Obr. 7 – Princip konstrukce měřicího mikroskopu a měřicího projektoru s hranovým senzorem
Werth: a) měřicí mikroskop b) měřicí projektor c) hranový senzor [8]

2.2.3 Souřadnicové měřicí stroje s křížovým stolem

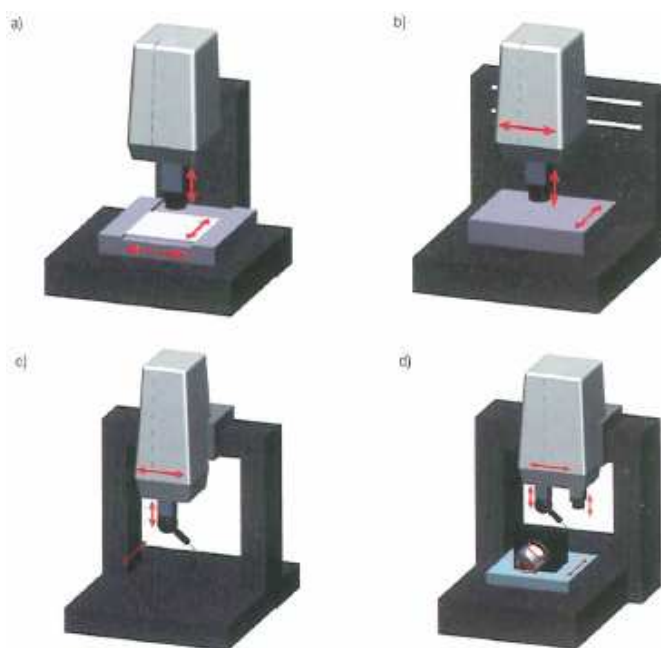
U těchto přístrojů převažuje plná automatizace ve všech třech osách. Rozsah měření se pohybuje mezi 200 mm až 400 mm.

Stroje s nejkvalitnějším stolem bývají vybaveny mechanickými snímacími systémy a laserovými senzory a to jsou již multisenzorové souřadnicové měřicí stroje [8].

2.2.4 Souřadnicové měřicí stroje s portálem

Aby byla zajištěna vyšší přesnost a větší rozsahy měření, bývá mechanické vedení konstrukce nahrazeno vzduchovými ložisky.

Tyto stroje se skládají z mostu, který se pohybuje ve směru první osy. Na mostu (ve směru druhé osy) se pohybuje měřicí suport, na kterém je nainstalována třetí osa (pinola) [8].



Obr. 8 – Konstrukce optických a multisenzorových souřadnicových měřicích strojů: a) stroj s křížovým stolem b) stroj se stolem konstrukce L c) portálový stroj s pohyblivým portálem d) portálový stroj s pevným portálem, dvě pinoly pro vybavení více senzory a otočně naklápěcí jednotka pro optické měření 3D geometrických prvků [8]

Souřadnicové měřicí stroje s portálem bývají vybaveny většinou dotykovými senzory. To proto, že zde vzniká problematická instalace kvalitního osvětlení, které je nutné pro zpracování obrazu. Měřený předmět se pohybuje ve směru první osy pomocí pohyblivého stolu. Otočné a otočně naklápěcí osy dovolují trojrozměrné měření komplexních dílců na jedno upnutí [8].“

2.3 Senzory pro souřadnicové měřicí stroje

K zachycení primárního signálu při měření objektu slouží senzory.

„Souřadnicové měřicí stroje mohou být vybaveny spínacími a měřicími senzory. Spínací senzory poskytují při snímání měřeného objektu pouze spouštěcí signál. Ten způsobí, že si přečtou systémy měřicí dráhu a určí se souřadnice. Ke zjištění souřadnic některého bodu objektu je bezpodmínečně nutný pohyb ve směru os – dynamický princip měření [8].“

V současnosti se běžné senzory dělí na:

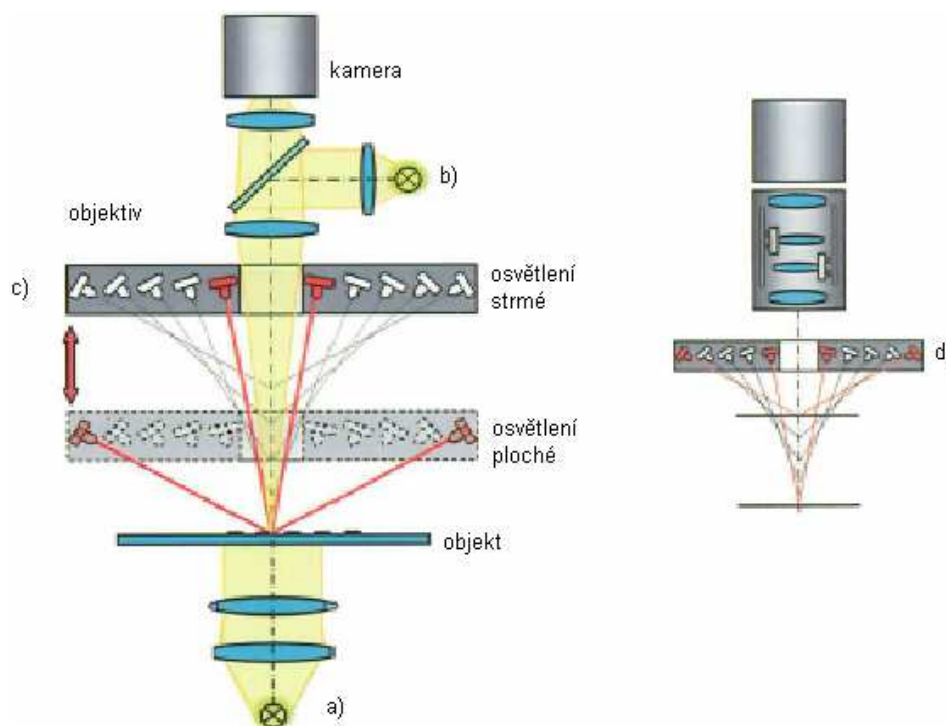
- *optické,*
- *dotykové,*
- *laserové.*

Na optický senzor se přenáší informace o poloze měřeného bodu pomocí světla – z toho lze stanovit příslušné souřadnice.

U dotykových senzorů se tato informace tvoří dotykem měřeného objektu se snímacím prvkem, většinou se snímací koulí [8].

2.3.1 Vizualní senzory

Vizuální senzory jsou takové, které mají za základ alespoň dvourozměrné zobrazení měřeného objektu. Senzor zachytí a vyhodnotí rozdělení intenzity tohoto optického obrazu. Výsledky měření závisí zásadně na obsluze. Vizualní snímání se používá při špatné viditelnosti měřené struktury objektu a geometrické prvky lze snímat pouze intuitivně [8].



Obr. 9 – Druhy osvětlení: a) procházející světlo, b) nasvícení světlých polí, c) nasvícení tmavých polí, d) nasvícení tmavých polí s kombinací se zoomem [8]

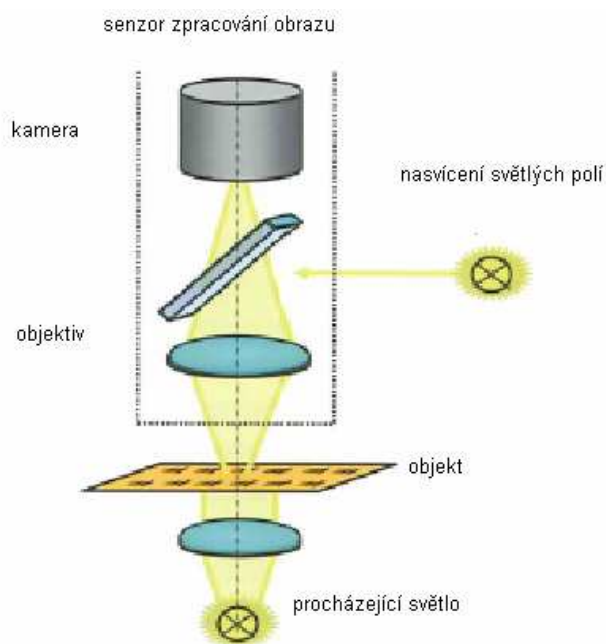
2.3.2 Hranový senzor

Spínacím senzorem pro projektory je hranový senzor. Světelný signál je zachycen tenkým skleněným vláknem a je veden na fotomultiplikátor. Každá hrana při měření vytvoří přechod světlá-tmavá, popř. tmavá-světlá [8].

„Nízké kontrasty, jaké se většinou vyskytují v dopadajícím světle, mohou vést k chybám měření, jelikož bodový senzor nepřipouští téměř vůbec strategie k rozlišení mezi znečištěním, povrchovými vadami a skutečnými snímanými geometrickými prvky [8].“

2.3.3 Senzor zpracování obrazu

Funguje na principu, že měřený objekt se přes objektiv zobrazí na maticové kameře. Elektronika této kamery převede optické signály na digitální obraz, který se použije k výpočtu měřených bodů ve vyhodnocovacím počítači se softwarem pro zpracování obrazu [8].



Obr. 10 - Princip konstrukce senzoru zpracování obrazu s osvětlením procházejícím a dopadajícím světlem [8]

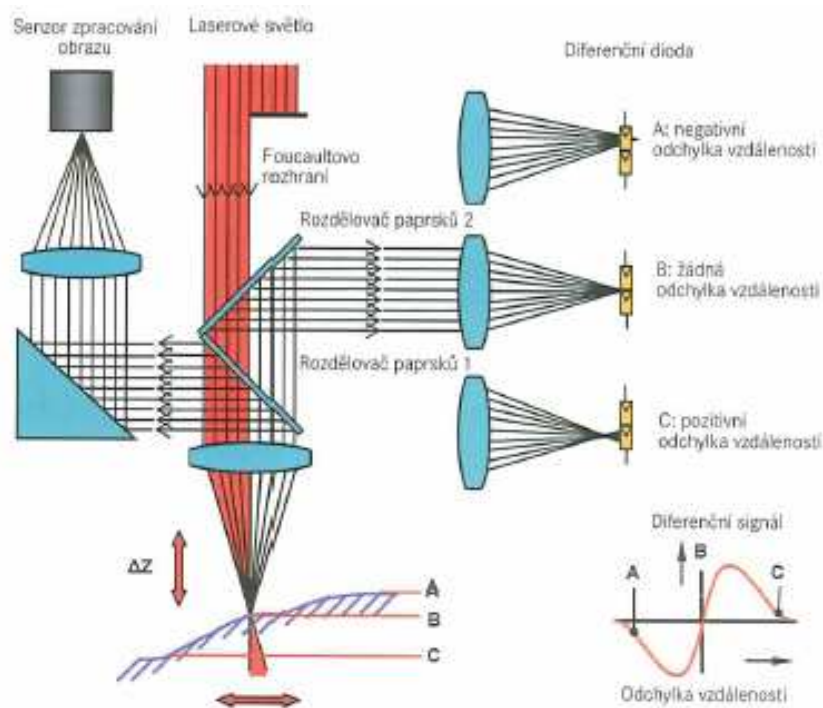
2.3.4 Senzory měřící vzdálenost

„Všemi předchozími senzory lze provádět měření jen v rovinách. Tím je možné jen měření dvourozměrných objektů (2D). Při trojrozměrném měření je však potřebná doplňková metoda k měření ve třetí souřadnici. Senzory měřící vzdálenost zjišťují vzdálenost mezi senzorem a povrchem měřeného objektu [8].“

2.3.5 Laserové bodové senzory

Tyto senzory fungují na principu kdy je na měřený objekt promítán světelný paprsek, který je vytvořený laserem.

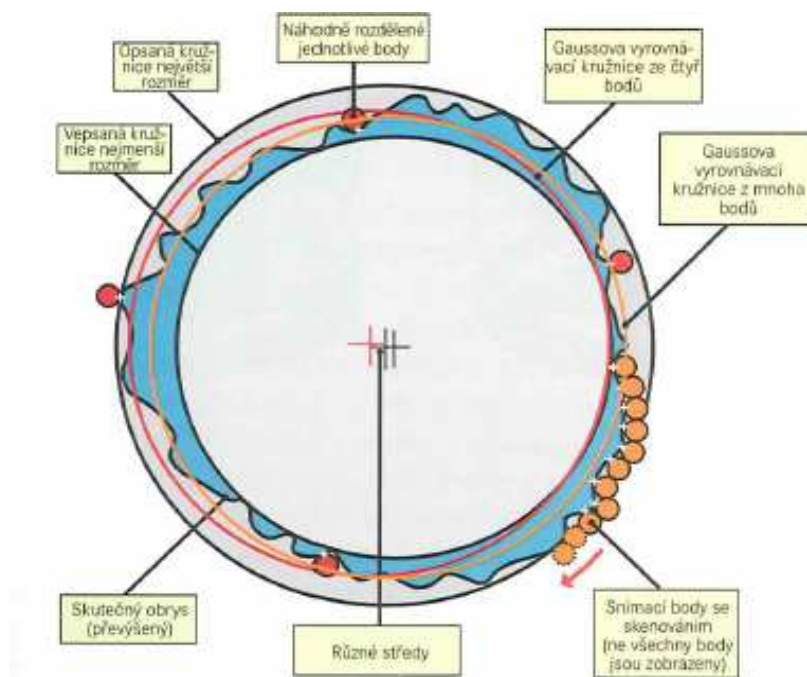
Pak odrážející se světlá skvrna se zobrazí na optoelektrickém senzoru. Poté se odvodí poloha měřeného objektu. Laserové senzory fungující na Foucaultově principu. Na objektu se poté zobrazí Foucaultovo rozhraní, které se nalézá v dráze paprsků [8].



Obr. 11 - Laserový senzor na Foucaultovu principu s integrovaným senzorem zpracování obrazu [8]

2.3.6 Dotykové senzory

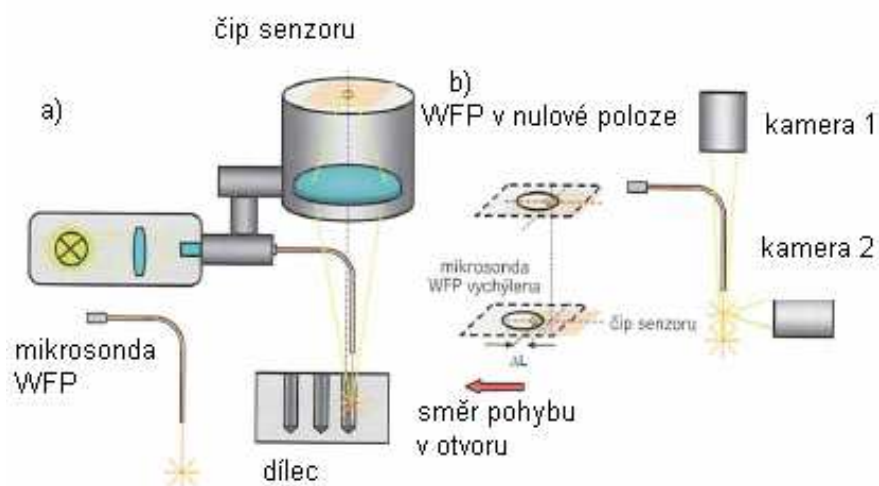
Princip měření spočívá v mechanickém dotyku měřeného objektu. Výsledek měření obsahuje geometrii snímací koule i polohu v prostoru a geometrický tvar měřeného povrchu objektu. U skenování dotykem se musí poloha snímaného bodu určit pomocí matematické korekce ze souřadnic středu snímací koule [8].



Obr. 12 – Vliv počtu měřených bodů na výsledek měření. Málo měřených bodů vede k nesprávné vyrovnávací kružnici [8]

2.3.7 Měřicí dotykově optický senzor

Vlastní měření polohy probíhá senzorem zpracování obrazu [8].



Obr. 13 - Princip funkce mikrosondy a) uspořádání měření 2D b) uspořádání měření 3D [8]

2.4 Podmínky přesného měření

„K dosažení vysoké přesnosti měření kruhovitosti povrchu je třeba nejen technicky vhodný a spolehlivý přístroj, ale i dodržení správného postupu a podmínek měření. Přípravu a vlastní proces měření mohou ovlivnit tyto aspekty:

- *prostředí měření,*
- *manipulace s kontrolovanou součástí,*
- *seřízení měřicího přístroje,*
- *ustavení součásti [1].“*

2.5 Chyby a nejistoty měření

2.5.1 Chyby měření

V praxi neexistuje žádná měřicí metoda ani měřicí přístroj, který by byl absolutně přesný. Vliv okolí, který se při měření vyskytuje, se projeví mezi naměřenou a skutečnou hodnotou sledované veličiny v podobě odchylky [9].

Chyby lze rozdělit na:

- hrubé,
- systematické,
- náhodné.

Chyby hrubé – vznikají nesprávným provedením měření, špatným odečtem údajů, vadou přístroje nebo také špatnou manipulací s měřicím zařízením [1].

Postup při testování odlehle hodnoty při neznámé směrodatné odchylce střední hodnotě:

- 1) Ze souboru naměřených hodnot $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ se vypočítá střední hodnota:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.5)$$

kde: \bar{x} - je střední hodnota
 n – je rozsah výběru

výběrová směrodatná odchylka

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.6)$$

kde: $s(x)$ – je výběrová směrodatná odchylka

\bar{x} - je střední hodnota

x_i – je naměřená hodnota

n – je rozsah výběru

- 2) Pro posouzení odlehlosti podezřelých hodnot souboru (x_2, x_n) se vypočítají normované hodnoty H_2, H_n ($x_2 < \bar{x}, x_n > \bar{x}$):

$$H_2 = \frac{\bar{x} - x_2}{s(x)} \quad (2.7)$$

popřípadě

$$H_2 = \frac{x_n - \bar{x}}{s(x)} \quad (2.8)$$

kde: H_2, H_n – normované hodnoty

$s(x)$ – je výběrová směrodatná odchylka

\bar{x} - je střední hodnota

x_i - je naměřená hodnota

n - je rozsah výběru

- 3) Z tabulek se určí mezní hodnota H pro předem stanovenou pravděpodobnost p a počet měření v souboru n [1].

Mezní hodnota pro pravděpodobnost $p = 95\%$ a pro počet měření $n = 5$ činí $H = 2,18$.

- 4) Za předpokladu, že $H_2 < H$ a $H_n < H$ hodnota x_2 není zatížena hrubou chybou a ponechává se v souboru, ale hodnota x_n je ovlivněna chybou a ze souboru naměřených hodnot se vyloučí [1].

Chyby systematické – vznikají z příčin, které působí soustavně a jednoznačně co do smyslu a velikosti. Působení systematické chyby se dá zjistit změnou měřicích poměrů [1].

Dle poznatelnosti se systematické chyby dělí na:

- zjistitelné – mají konkrétní znaménko a hodnotu,
- neznámé – nemají konkrétní znaménko a zachází se s nimi jako s chybami náhodnými [1].

Chyby náhodné – jsou způsobené příčinami náhodného charakteru co do velikosti a směru působení. Při každém jednotlivém měření určité veličiny se vyskytují náhodné chyby a ovlivňují každou naměřenou hodnotu [1].

2.5.2 Nejistoty měření

Nejistotou měření se rozumí parametr charakterizující rozsah hodnot kolem výsledku měření, který můžeme odůvodněně přiřadit hodnotě měřené veličiny. Může se týkat výsledku měření, ale též hodnot odečtených na použitých přístrojích, hodnot použitých konstant, korekce, atd., na kterých nejistota výsledku závisí [1].

Dříve se při vyhodnocování souborů naměřených hodnot pracovalo s chybami, avšak nyní je vyhodnocování prováděno prostřednictvím vyjádření nejistot měření [9].

Standardní nejistota typu A (u_A):

- získává se z opakovaných měření,
- s počtem měření její hodnota klesá,
- při nezávislých naměřených hodnotách se standardní nejistota váže na výběrový průměr a zjistí se výpočtem směrodatné odchylky $s(\bar{x})$ [1]:

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (2.9)$$

Standardní nejistota typu B (u_B):

- hodnota nezávisí na počtu měření,
- metodika určování této nejistoty je metodika určování standardní nejistoty vázané na výběrový průměr určena jiným způsobem, nikoliv výpočtem směrodatné odchylky z opakovaných měření [1].

$$u_B(X) = \sqrt{\sum_i u_{Bi}^2} \quad (2.10)$$

kde: u_{Bi}^2 - součet kvadrátů všech zdrojů nejistot typu B [1].

Kombinovaná standardní nejistota u_c :

- je kladnou druhou odmocninou ze součtu kvadrátů standardních nejistot u_A , u_B :

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (2.11)$$

kde: u_c – je kombinovaná standardní nejistota
 u_A – je standardní nejistota typu A
 u_B – je standardní nejistota typu B [1]

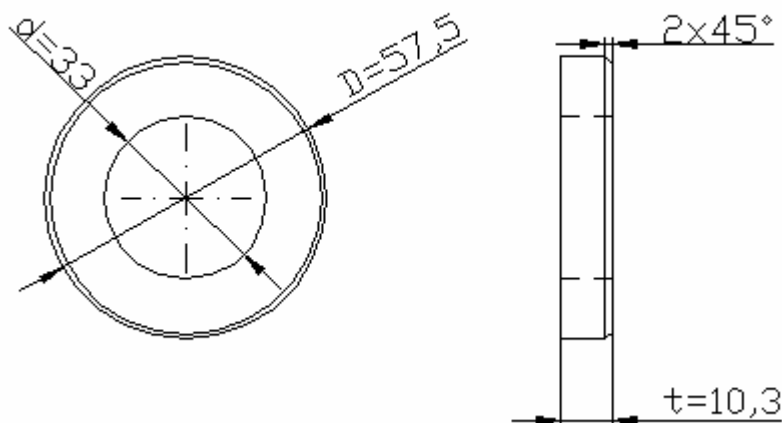
Rozšířená kombinovaná nejistota je vyjádřena vztahem:

$$U_c = k_u \cdot u_c \quad (2.12)$$

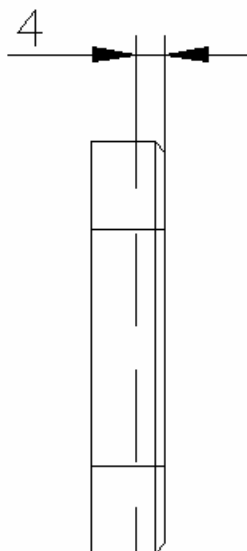
kde: U_c – je rozšířená kombinovaná nejistota
 u_c – je kombinovaná standardní nejistota
 k_u – je koeficient rozšíření (pokrytí) [1].

3. Experimentální část

K měření odchylky kruhovitosti ΔZ byl použit vymezovací kroužek o rozměrech $d=33$ mm, $D=57,5$ mm a $t=10,3$ mm. Měření bylo provedeno jak na optických přístrojích, tak i na přístrojích měřících dotykovou metodou. Měření oběma metodami nám umožní jejich vzájemné srovnání. Měření na dotykových přístrojích bylo realizováno v Poznani v Polsku - „Instytut Technologii Mechanicznej - Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych“. Na součásti byl měřen vždy vnitřní i vnější průměr a to vřezu 4 mm od čela.



Obr. 14 – Náčrt měřené součásti – vymezovací kroužek



Obr. 15 – Náčrt měřené součásti – řez 4 mm od čela

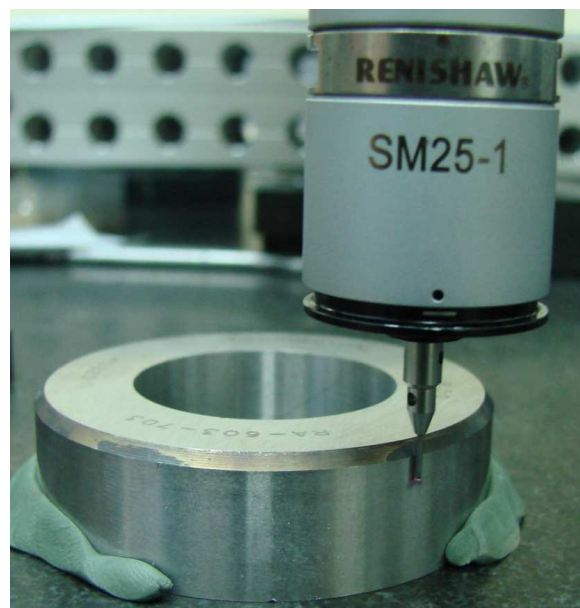
3.1 Měření součástky dotykovou metodou na přístroji DEA

Global – IMAGE clima

Měření součástky na portálovém souřadnicovém přístroji DEA Global – IMAGE clima bylo realizováno na Institut Technologii Mechanicznej - Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych v Poznani. Měřená součást byla měřena dotykovou sondou o průměru kuličky 1mm. Součást byla měřena v 10ti řezích od čela součásti ve 4 až 32 bodech a to pokaždé desetkrát, aby bylo možné tato měření správně vyhodnotit jak na základě naměřených hodnot, tak i z důvodu statistického zpracování. Při měření byl použit Gaussův filtr.



Obr. 16 – Měřicí přístroj DEA Global – IMAGE clima [7]



Obr. 17 - Měřicí sonda SM25-1

Podmínky měření a parametry měřicího stroje DEA Global – IMAGE clima:

- | | |
|---------------------------------|---|
| ➤ Teplota prostředí: | 20°C; |
| ➤ rozměry součásti: | vnitřní ϕ 33mm;
vnější ϕ 57,5mm; |
| ➤ měřicí sonda kontaktní sonda: | SM 25-1; |
| ➤ průměr měřicího dotyku: | ϕ 1 mm; |
| ➤ vyhodnocovací metoda: | LSCI, MZCI, MICI, MCCI; |

- použitý filtr: Gauss;
- vyhodnocovací software: PC DMIS CAD ++;
- přesnost stroje při teplotě 18 – 20°C, max 1 K/h:

$$\text{MPE}_E = 1,5 + L/333 \text{ } \mu\text{m} \quad (L \text{ je v mm});$$

$$\text{MPE}_P = 1,7 \text{ } \mu\text{m} \text{ [19].}$$

Přesnost měřicích přístrojů

Přesnost měřicího přístroje je jeho schopnost poskytovat údaje blízké pravé hodnotě měřené veličiny [10].

3.1.1 Měření vnitřního průměru

Měření vnitřního i vnějšího průměru na přístroji DEA Global – IMAGE clima bylo realizováno tak, že bylo měřeno vždy množství bodů 4 až 32 a to pro každý parametr zvlášť – tedy – LSCI, MZCI, MICI a MCCI. Aby bylo možné správně vyhodnotit naměřené hodnoty a také jejich statistické zpracování, bylo měření vždy realizováno desetkrát. Tabulky níže ukazují aritmetický průměr $\Delta\bar{Z}$ [mm] vypočítaný vždy z deseti měření a dále je pak vypočítána i nejistota typu A - u_A .

Tab. 3 – Hodnoty měřených bodů 4 až 32 pro parametr LSCI – vnitřní průměr

Parametr:	LSCI														
Počet měřených bodů:	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Počet měření v řezu:	10														
Aritmetický průměr ΔZ:	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,002	0,003	0,003	0,003	0,002
Nejistota uA:	0,00012	0,00007	0,00013	0,00015	0,00014	0,00014	0,00014	0,00015	0,00012	0,00015	0,00013	0,00015	0,00014	0,00016	0,00016
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	Jednotky
	0,003	0,003	0,003	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	[mm]
	0,00014	0,00014	0,00014	0,00011	0,00014	0,00014	0,00010	0,00013	0,00014	0,00012	0,00011	0,00012	0,00009	0,00013	[mm]

Tab. 4 – Hodnoty měřených bodů 4 až 32 pro parametr MZCI - vnitřní průměr

Parametr:	MZCI														
Počet měřených bodů:	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Počet měření v řezu:	10														
Aritmetický průměr ΔZ:	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Nejistota uA:	0,00012	0,00006	0,00011	0,00013	0,00011	0,00012	0,00013	0,00013	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	Jednotky
	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	[mm]
	0,00011	0,00012	0,00012	0,00011	0,00010	0,00012	0,00011	0,00011	0,00011	0,00011	0,00009	0,00020	0,00008	0,00009	[mm]

Tab. 5 – Hodnoty měřených bodů 4 až 32 pro parametr MICI - vnitřní průměr

Parametr:	MICI														
Počet měřených bodů:	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Počet měření v řezu:	10														
Aritmetický průměr ΔZ :	0,003	0,001	0,002	0,003	0,002	0,002	0,003	0,003	0,002	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003	0,003
Nejistota uA:	0,00024	0,00008	0,00017	0,00020	0,00016	0,00016	0,00017	0,00022	0,00013	0,00015	0,00019	0,00021	0,00018	0,00018	0,00015
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	Jednotky
	0,003	0,003	0,004	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	[mm]
	0,00020	0,00020	0,00020	0,00012	0,00018	0,00017	0,00013	0,00018	0,00013	0,00016	0,00011	0,00016	0,00012	0,00016	[mm]

Tab. 6 – Hodnoty měřených bodů 4 až 32 pro parametr MCCI - vnitřní průměr

Parametr:	MCCI														
Počet měřených bodů:	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Počet měření v řezu:	10														
Aritmetický průměr ΔZ :	0,003	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0,004	0,002	0,003	0,003	0,003	0,002
Nejistota uA:	0,00024	0,00009	0,00016	0,00014	0,00014	0,00017	0,00019	0,00018	0,00013	0,00022	0,00013	0,00016	0,00013	0,00022	0,00013
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	Jednotky
	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003	[mm]
	0,00020	0,00016	0,00017	0,00014	0,00017	0,00017	0,00017	0,00020	0,00019	0,00012	0,00012	0,00015	0,00013	0,00009	[mm]

Postup měření vnějšího průměru součásti byl stejný jako u měření jejího vnitřního průměru.

Tabulky níže obsahují hodnoty těchto měření.

Tab. 7 – Hodnoty měřených bodů 4 až 32 pro parametr MCCI - vnější průměr

Parametr:	LSCI														
Počet měřených bodů:	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Počet měření v řezu:	10														
Aritmetický průměr ΔZ :	0,003	0,004	0,004	0,003	0,004	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Nejistota uA:	0,00010	0,00013	0,00005	0,00005	0,00010	0,00010	0,00009	0,00010	0,00010	0,00010	0,00013	0,00008	0,00012	0,00011	0,00006
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	Jednotky
	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	[mm]
	0,00007	0,00011	0,00007	0,00008	0,00007	0,00007	0,00007	0,00010	0,00011	0,00010	0,00009	0,00007	0,00007	0,00008	[mm]

Tab. 8 – Hodnoty měřených bodů 4 až 32 pro parametr MCCI - vnější průměr

Parametr:	MZCI														
Počet měřených bodů:	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Počet měření v řezu:	10														
Aritmetický průměr ΔZ :	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003
Nejistota uA:	0,00010	0,00011	0,00008	0,00004	0,00009	0,00010	0,00009	0,00010	0,00008	0,00008	0,00017	0,00010	0,00011	0,00009	0,00007
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	Jednotky
	0,004	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003	0,004	0,004	[mm]
	0,00008	0,00008	0,00007	0,00007	0,00007	0,00007	0,00006	0,00008	0,00009	0,00007	0,00008	0,00007	0,00008	0,00008	[mm]

Tab. 9 – Hodnoty měřených bodů 4 až 32 pro parametr MICI - vnější průměr

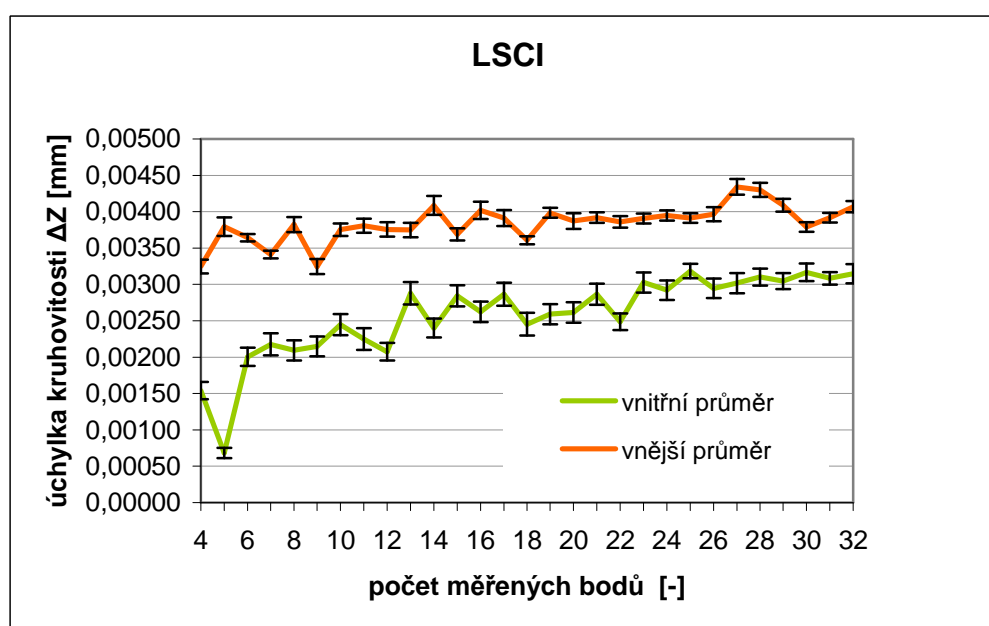
Parametr:	MICI														
Počet měřených bodů:	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Počet měření v řezu:	10														
Aritmetický průměr ΔZ :	0,006	0,004	0,004	0,003	0,004	0,003	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,005	0,005	0,004
Nejistota uA:	0,00019	0,00012	0,00018	0,00003	0,00018	0,00012	0,00023	0,00019	0,00013	0,00013	0,00013	0,00021	0,00022	0,00020	0,00017
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	Jednotky
	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,005	[mm]
	0,00020	0,00019	0,00009	0,00006	0,00009	0,00012	0,00010	0,00011	0,00038	0,00005	0,00010	0,00013	0,00008	0,00017	[mm]

Tab. 10 – Hodnoty měřených bodů 4 až 32 pro parametr MCCI - vnější průměr

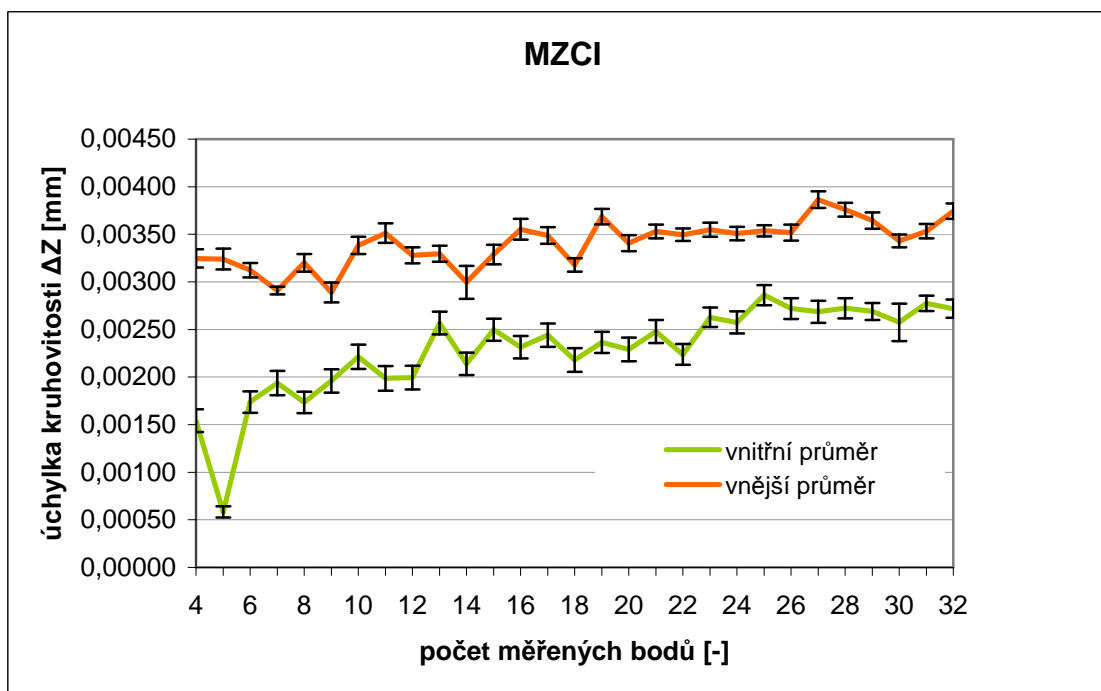
Parametr:	MCCI														
Počet měřených bodů:	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Počet měření v řezu:	10														
Aritmetický průměr ΔZ :	0,006	0,005	0,005	0,004	0,006	0,004	0,005	0,005	0,006	0,005	0,006	0,005	0,006	0,005	0,005
Nejistota uA:	0,00019	0,00017	0,00011	0,00004	0,00024	0,00023	0,00005	0,00009	0,00027	0,00012	0,00016	0,00010	0,00022	0,00009	0,00014
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	Jednotky
	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	0,005	0,005	0,005	0,006	[mm]
	0,00009	0,00021	0,00012	0,00012	0,00013	0,00012	0,00012	0,00006	0,00008	0,00018	0,00014	0,00007	0,00005	0,00022	[mm]

3.1.3 Grafické vyhodnocení měřených hodnot dotykovou metodou na přístroji DEA Global – IMAGE clima

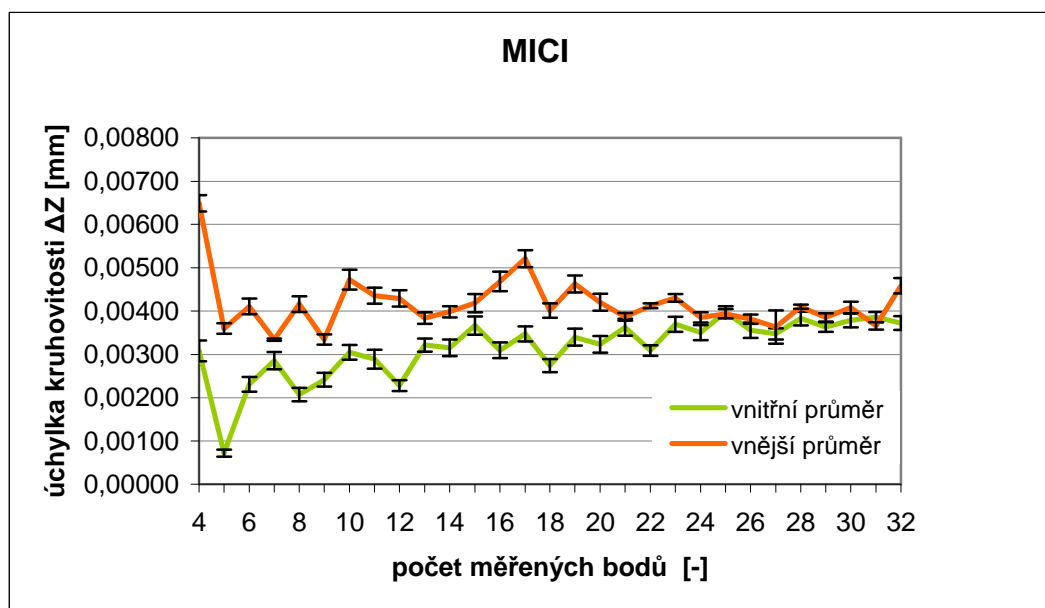
Na základě výpočtu aritmetického průměru úchylky kruhovitosti $\Delta \bar{Z}$ [mm] při parametrech LSCI, MZCI, MICI, MCCI byly vykresleny grafy. Grafy vždy srovnávají jeden parametr a to u měření vnitřního a vnějšího průměru. U každé hodnoty je také vždy znázorněn její rozptyl.



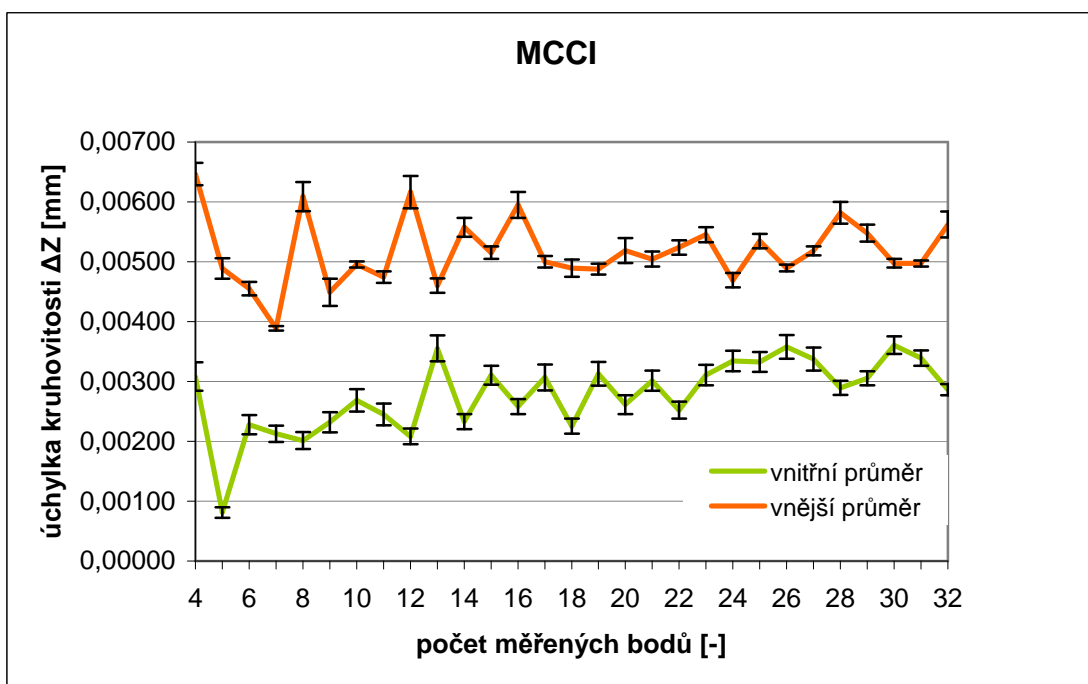
Obr. 18 – Graf závislosti aritmetického průměru úchylky kruhovitosti $\Delta \bar{Z}$ na počtu měřených bodů pro parametr LSCI – srovnání měření vnitřního a vnějšího průměru



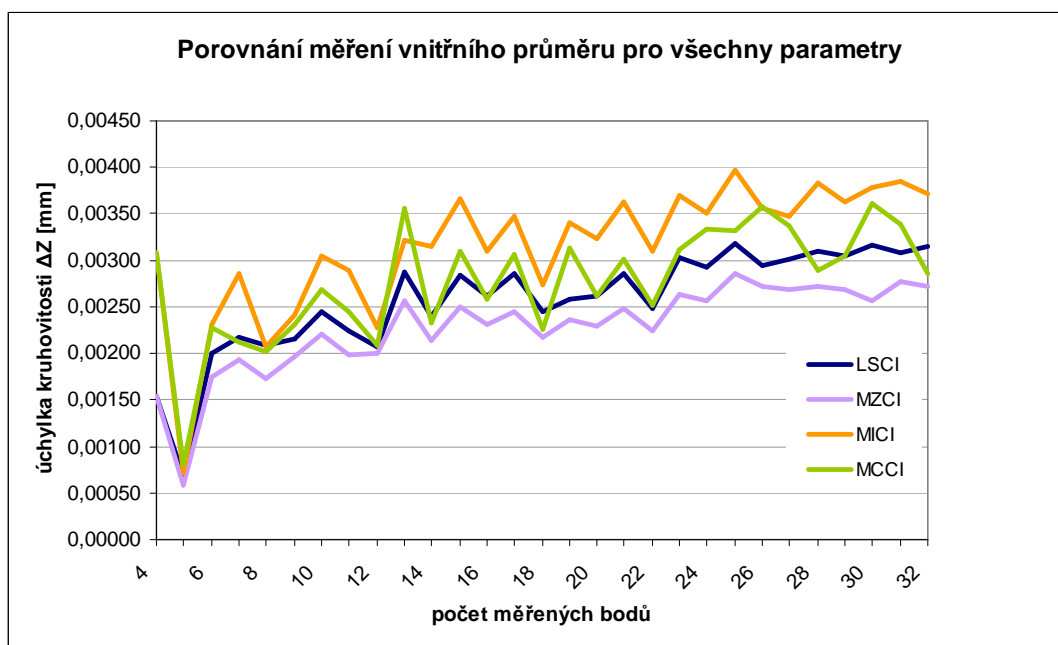
Obr. 19 – Graf závislosti aritmetického průměru úchylky kruhovitosti $\overline{\Delta Z}$ na počtu měřených bodů pro parametr MZCI – srovnání měření vnitřního a vnějšího průměru



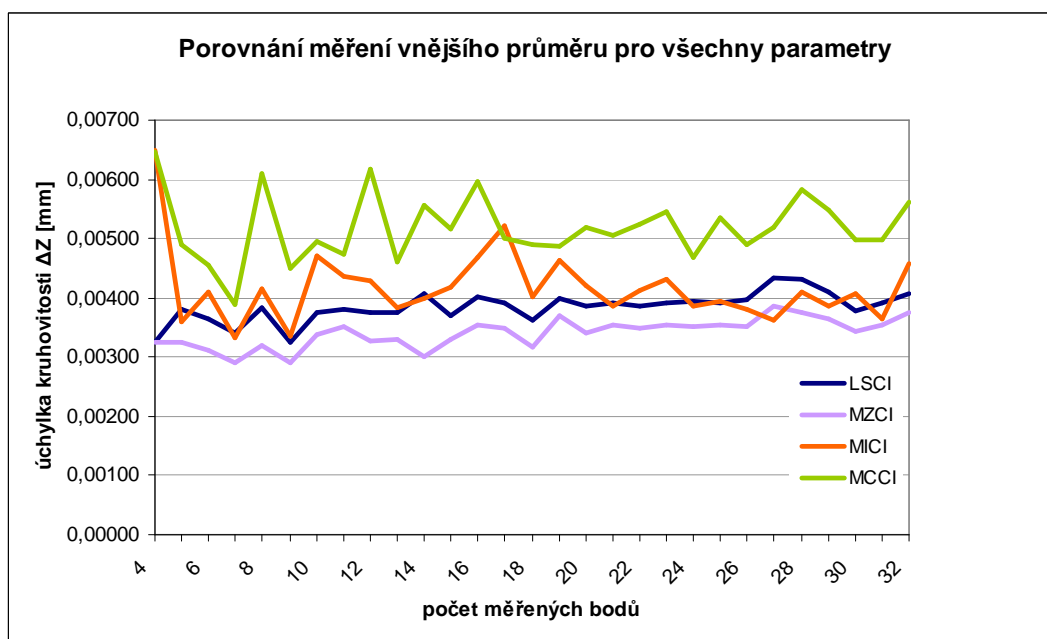
Obr. 20 – Graf závislosti aritmetického průměru úchylky kruhovitosti $\overline{\Delta Z}$ na počtu měřených bodů pro parametr MICI – srovnání měření vnitřního a vnějšího průměru



Obr. 21 – Graf závislosti aritmetického průměru úchylky kruhovitosti $\Delta \bar{Z}$ na počtu měřených bodů pro parametr MCCI – srovnání měření vnitřního a vnějšího průměru



Obr. 22 – Graf závislosti aritmetického průměru úchylky kruhovitosti $\Delta \bar{Z}$ na počtu měřených bodů pro všechny parametry při měření vnitřního průměru



Obr. 23 – Graf závislosti aritmetického průměru úchylky kruhovitosti $\Delta \bar{Z}$ na počtu měřených bodů pro všechny parametry při měření vnějšího průměru

3.1.4 Zhodnocení měření úchylky kruhovitosti na přístroji DEA Global-IMAGE clima

Pokud je měřená součást určená k montáži, doporučuje se podle Weckenmanna a Knauera sledovat parametr MICI u vnitřního průměru a parametr MCCI pro vnější průměr.

Na základě uvedených grafů závislosti aritmetického průměru úchylky kruhovitosti $\Delta \bar{Z}$ na počtu měřených bodů pro parametry LSCI, MZCI, MICI a MCCI lze konstatovat, že tyto statisticky naměřené hodnoty vykazují nejnižší odchylku u parametru MZCI pro vnitřní průměr a pro vnější průměr jsou nejnižší hodnoty úchylky kruhovitosti pro parametr také MZCI.

Z grafu lze také vyčíst, že velikost rozptylu se s rostoucím počtem měřených bodů zmenšuje.

Hodnoty úchylky kruhovitosti jsou nižší u měření vnitřního průměru a tudíž je toto měření přesnější. Je to dáno tím, že množství bodů u vnitřního průměru je měřeno vždy na menší ploše než stejné množství bodů na ploše větší-tedy vnější průměr.

3.2 Měření součástky pomocí skenování na přístroji DEA

Global - IMAGE clima

Měření skenovací metodou bylo také realizováno na přístroji DEA Global – IMAGE clima v Poznani v Polsku - „Instytut Technologii Mechanicznej - Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych“. Při měření byla použita sonda SM 25-1.

Skenovací režim pracuje v měřicím režimu s trvalým kontaktem měřicího hrotu a měřeného objektu. Měřicí bod bývá upevnění ve třech navzájem kolmých pružinových paralelogramech [7].

Na součásti bylo provedeno měření s použitím Gaussova filtru a bez použití filtru. Protože měření bez použití filtru zahrnuje i např. nečistoty povrchu součásti a mohly by tak být značně ovlivněny hodnoty měření, proto byl tento filtr použitý. Úchylka kruhovitosti byla měřena pro parametry LSCI, MZCI, MICI a MCCI bez použití filtru i s jeho použitím při počtu snímaných bodů: 1b/1mm, 2b/1mm, 3b/1mm, 5b/1mm, 10b/1mm, 50b/1mm, 2b/5mm, 3b/5mm, 5b/5mm, 10b/5mm, 50b/5mm, 1b/10mm, 2b/10mm, 3b/10mm, 5b/10mm, 10b/10mm a 50b/10mm v obloukové míře (1b/1mm = 109 bodů).

Z hlediska nejpřesnějších výsledků měření úchylky kruhovitosti je v textu hodnoceno jen měření s filtrem. Měření bez použití filtru se nachází v příloze.

Tab. 11 – Převod z obloukové míry-vnitřní průměr

1b/1mm	2b/1mm	3b/1mm	5b/1mm	10b/1mm	50b/1mm
100b	200b	300b	500b	1000b	5000b

Tab. 12 – Převod z obloukové míry – vnější průměr

1b/1mm	2b/1mm	3b/1mm	5b/1mm	10b/1mm	50b/1mm
183b	366b	549b	915b	1830b	9150b

3.2.1 Měření skenováním vnitřního průměru s použitím filtru

Tab. 13 – Naměřené hodnoty skenováním vnitřního průměru s použitím Gaussova filtru-LSCI

Parametr:	LSCI									Jednotky
Počet měřených bodů:	1b/1mm	2b/1mm	3b/1mm	5b/1mm	10b/1mm	50b/1mm	1b/5mm	2b/5mm	3b/5mm	
Počet měření v řezu:	10									
Aritmetický průměr ΔZ :	0,003	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	[mm]
Nejistota uA:	0,00010	0,00010	0,00010	0,00015	0,00008	0,00009	0,00009	0,00010	0,00007	[mm]
Parametr:	LSCI									Jednotky
Počet měřených bodů:	5b/5mm	10b/5mm	50b/5mm	1b/10mm	2b/10mm	3b/10mm	5b/10mm	10b/10mm	50b/10mm	
Počet měření v řezu:	10									
Aritmetický průměr ΔZ :	0,004	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	[mm]
Nejistota uA:	0,00007	0,00009	0,00008	0,00011	0,00008	0,00013	0,00011	0,00012	0,00010	[mm]

Tab. 14 – Naměřené hodnoty skenováním vnitřního průměru s použitím Gaussova filtru-MZCI

Parametr:	MZCI									Jednotky
Počet měřených bodů:	1b/1mm	2b/1mm	3b/1mm	5b/1mm	10b/1mm	50b/1mm	1b/5mm	2b/5mm	3b/5mm	
Počet měření v řezu:	10									
Aritmetický průměr ΔZ :	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	[mm]
Nejistota uA:	0,00006	0,00007	0,00004	0,00007	0,00006	0,00005	0,00005	0,00003	0,00003	[mm]
Parametr:	MZCI									Jednotky
Počet měřených bodů:	5b/5mm	10b/5mm	50b/5mm	1b/10mm	2b/10mm	3b/10mm	5b/10mm	10b/10mm	50b/10mm	
Počet měření v řezu:	10									
Aritmetický průměr ΔZ :	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	[mm]
Nejistota uA:	0,00005	0,00008	0,00004	0,00004	0,00005	0,00004	0,00006	0,00005	0,00007	[mm]

Tab. 15 – Naměřené hodnoty skenováním vnitřního průměru s použitím Gaussova filtru-MICI

Parametr:	MICI									Jednotky
Počet měřených bodů:	1b/1mm	2b/1mm	3b/1mm	5b/1mm	10b/1mm	50b/1mm	1b/5mm	2b/5mm	3b/5mm	
Počet měření v řezu:	10									
Aritmetický průměr ΔZ :	0,003	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,003	[mm]
Nejistota uA:	0,00012	0,00013	0,00008	0,00011	0,00014	0,00012	0,00007	0,00012	0,00011	[mm]
Parametr:	MICI									Jednotky
Počet měřených bodů:	5b/5mm	10b/5mm	50b/5mm	1b/10mm	2b/10mm	3b/10mm	5b/10mm	10b/10mm	50b/10mm	
Počet měření v řezu:	10									
Aritmetický průměr ΔZ :	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	[mm]
Nejistota uA:	0,00012	0,00020	0,00013	0,00009	0,00011	0,00015	0,00020	0,00006	0,00013	[mm]

Tab. 16 – Naměřené hodnoty skenováním vnitřního průměru s použitím Gaussova filtru-MCCI

Parametr:	MCCI									Jednotky
Počet měřených bodů:	1b/1mm	2b/1mm	3b/1mm	5b/1mm	10b/1mm	50b/1mm	1b/5mm	2b/5mm	3b/5mm	
Počet měření v řezu:	10									
Aritmetický průměr ΔZ :	0,003	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	[mm]
Nejistota uA:	0,00010	0,00010	0,00010	0,00015	0,00008	0,00009	0,00009	0,00010	0,00007	[mm]
Parametr:	MCCI									Jednotky
Počet měřených bodů:	5b/5mm	10b/5mm	50b/5mm	1b/10mm	2b/10mm	3b/10mm	5b/10mm	10b/10mm	50b/10mm	
Počet měření v řezu:	10									
Aritmetický průměr ΔZ :	0,004	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	[mm]
Nejistota uA:	0,00007	0,00009	0,00008	0,00011	0,00008	0,00014	0,00011	0,00012	0,00011	[mm]

3.2.2 Měření skenováním vnějšího průměru s použitím filtru

Tab. 17 – Naměřené hodnoty skenováním vnějšího průměru s použitím Gaussova filtru-LSCI

Parametr:	LSCI									Jednotky
Počet měřených bodů:	1b/1mm	2b/1mm	3b/1mm	5b/1mm	10b/1mm	50b/1mm	1b/5mm	2b/5mm	3b/5mm	
Počet měření v řezu:	10									
Aritmetický průměr ΔZ:	0,004	0,004	0,004	0,005	0,004	0,005	0,005	0,005	0,005	[mm]
Nejistota uA:	0,00011	0,00015	0,00014	0,00013	0,00015	0,00014	0,00006	0,00014	0,00009	[mm]
Parametr:	LSCI									Jednotky
Počet měřených bodů:	5b/5mm	10b/5mm	50b/5mm	1b/10mm	2b/10mm	3b/10mm	5b/10mm	10b/10mm	50b/10mm	
Počet měření v řezu:	10									
Aritmetický průměr ΔZ:	0,005	0,004	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	[mm]
Nejistota uA:	0,00010	0,00009	0,00007	0,00013	0,00014	0,00007	0,00005	0,00014	0,00014	[mm]

Tab. 18 – Naměřené hodnoty skenováním vnějšího průměru s použitím Gaussova filtru-MZCI

Parametr:	MZCI									Jednotky
Počet měřených bodů:	1b/1mm	2b/1mm	3b/1mm	5b/1mm	10b/1mm	50b/1mm	1b/5mm	2b/5mm	3b/5mm	
Počet měření v řezu:	10									
Aritmetický průměr ΔZ:	0,004	0,004	0,004	0,005	0,004	0,005	0,005	0,005	0,005	[mm]
Nejistota uA:	0,00011	0,00015	0,00014	0,00013	0,00015	0,00014	0,00006	0,00014	0,00009	[mm]
Parametr:	MZCI									Jednotky
Počet měřených bodů:	5b/5mm	10b/5mm	50b/5mm	1b/10mm	2b/10mm	3b/10mm	5b/10mm	10b/10mm	50b/10mm	
Počet měření v řezu:	10									
Aritmetický průměr ΔZ:	0,005	0,004	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	[mm]
Nejistota uA:	0,00010	0,00009	0,00007	0,00013	0,00014	0,00007	0,00005	0,00014	0,00014	[mm]

Tab. 19 – Naměřené hodnoty skenováním vnějšího průměru s použitím Gaussova filtru-MICI

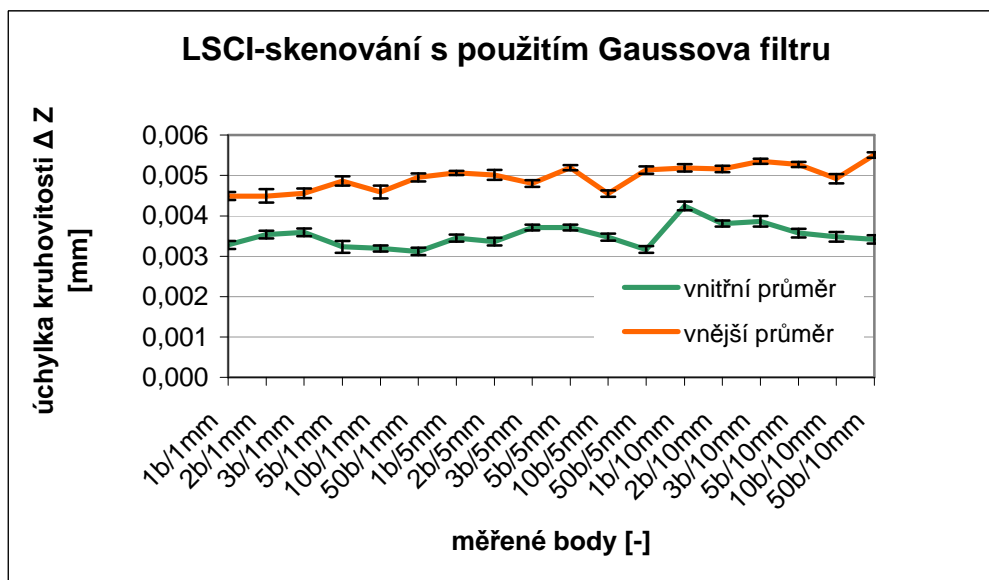
Parametr:	MICI									Jednotky
Počet měřených bodů:	1b/1mm	2b/1mm	3b/1mm	5b/1mm	10b/1mm	50b/1mm	1b/5mm	2b/5mm	3b/5mm	
Počet měření v řezu:	10									
Aritmetický průměr ΔZ:	0,004	0,004	0,004	0,005	0,004	0,005	0,005	0,005	0,005	[mm]
Nejistota uA:	0,00011	0,00015	0,00014	0,00013	0,00015	0,00014	0,00006	0,00014	0,00009	[mm]
Parametr:	MICI									Jednotky
Počet měřených bodů:	5b/5mm	10b/5mm	50b/5mm	1b/10mm	2b/10mm	3b/10mm	5b/10mm	10b/10mm	50b/10mm	
Počet měření v řezu:	10									
Aritmetický průměr ΔZ:	0,005	0,004	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	[mm]
Nejistota uA:	0,00010	0,00009	0,00007	0,00013	0,00014	0,00007	0,00005	0,00014	0,00014	[mm]

Tab. 20 – Naměřené hodnoty skenováním vnitřního průměru s použitím Gaussova filtru-MCCI

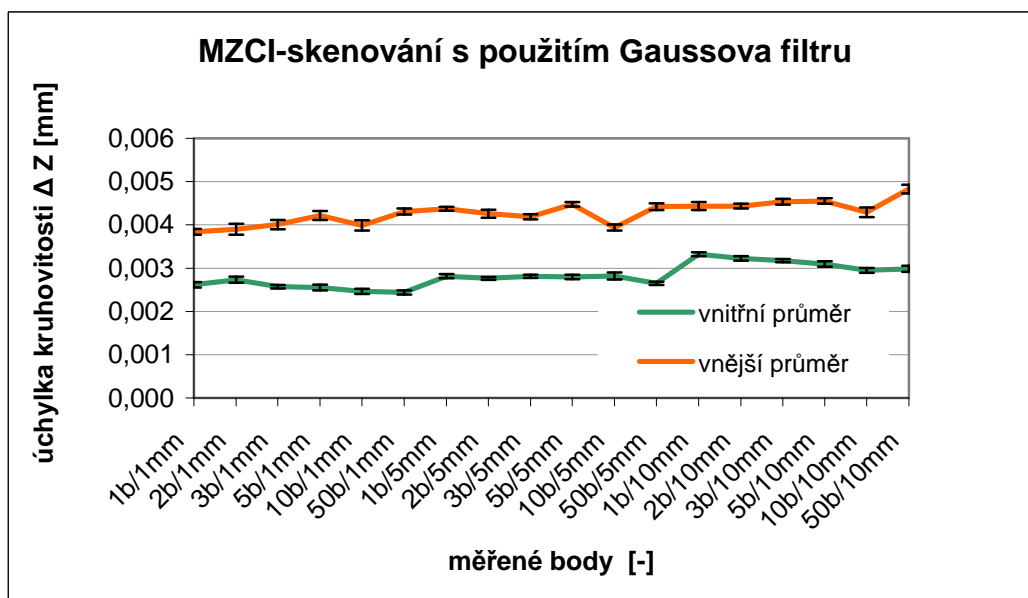
Parametr:	MCCI									Jednotky
Počet měřených bodů:	1b/1mm	2b/1mm	3b/1mm	5b/1mm	10b/1mm	50b/1mm	1b/5mm	2b/5mm	3b/5mm	
Počet měření v řezu:	10									
Aritmetický průměr ΔZ:	0,004	0,004	0,004	0,005	0,004	0,005	0,005	0,005	0,005	[mm]
Nejistota uA:	0,00011	0,00015	0,00014	0,00013	0,00015	0,00014	0,00006	0,00014	0,00009	[mm]
Parametr:	MCCI									Jednotky
Počet měřených bodů:	5b/5mm	10b/5mm	50b/5mm	1b/10mm	2b/10mm	3b/10mm	5b/10mm	10b/10mm	50b/10mm	
Počet měření v řezu:	10									
Aritmetický průměr ΔZ:	0,005	0,004	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	[mm]
Nejistota uA:	0,00010	0,00009	0,00007	0,00013	0,00014	0,00007	0,00005	0,00014	0,00014	[mm]

3.2.3 Grafické vyhodnocení naměřených hodnot úchyly kruhovitosti metodou skenování na přístroji Dea Global – IMAGE clima

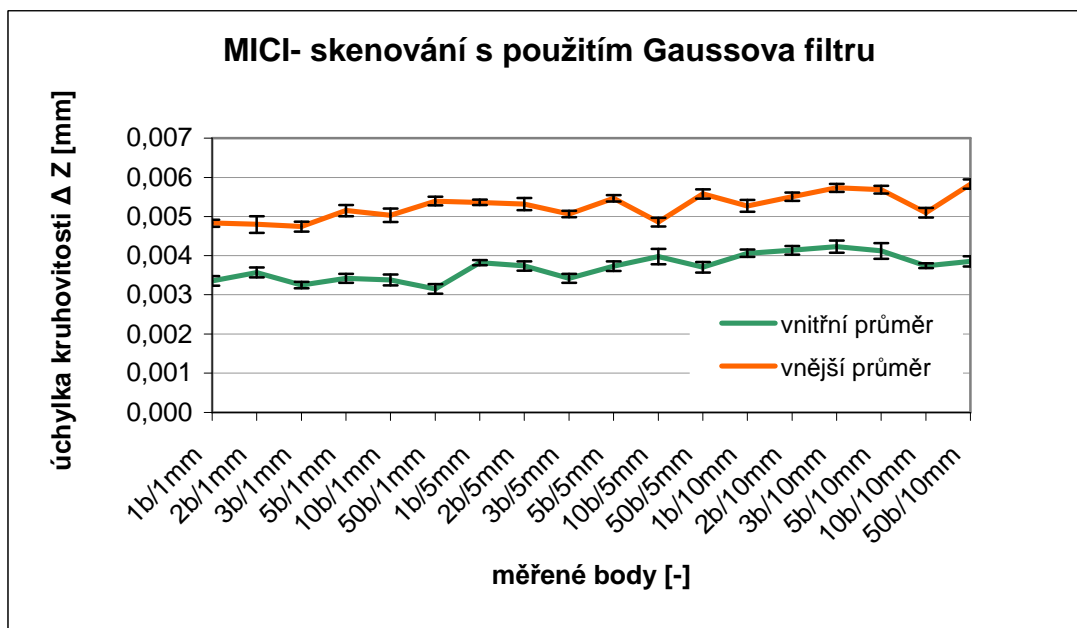
Na základě změřených hodnot úchyly kruhovitosti a výpočtu aritmetického průměru úchyly kruhovitosti z deseti měření byly vykresleny grafy pro parametry LSCI, MZCI, MICI a MCCI s porovnáním vnitřního a vnějšího průměru. Naměřené hodnoty byly zpracovány statisticky.



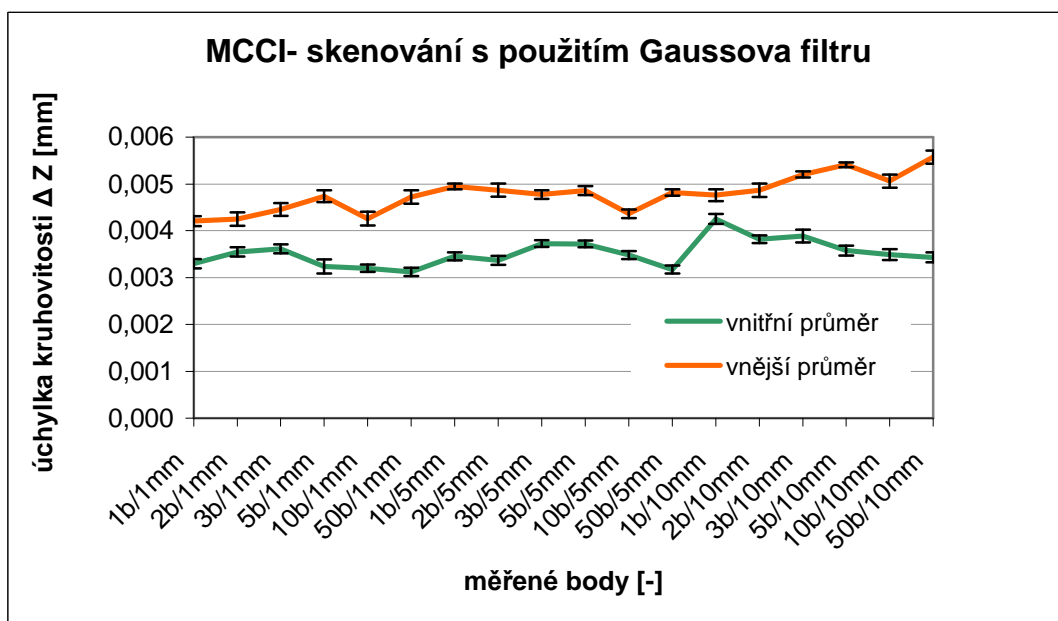
Obr. 24 – Graf závislosti aritmetického průměru úchyly kruhovitosti $\overline{\Delta Z}$ na počtu měřených bodů – LSCI



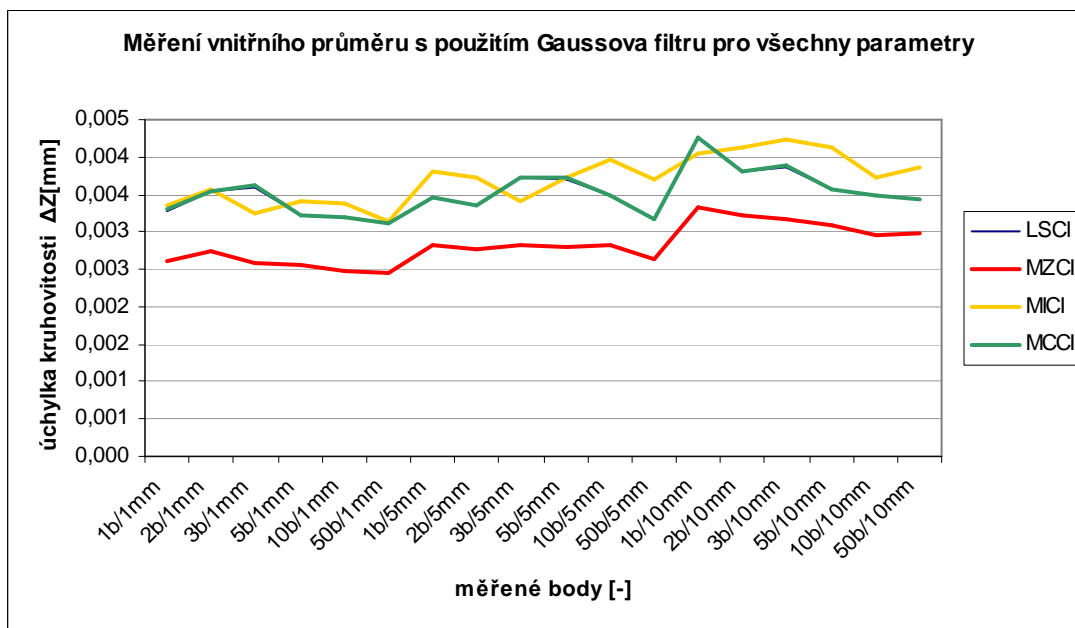
Obr. 25 – Graf závislosti aritmetického průměru úchyly kruhovitosti $\overline{\Delta Z}$ na počtu měřených bodů – MZCI



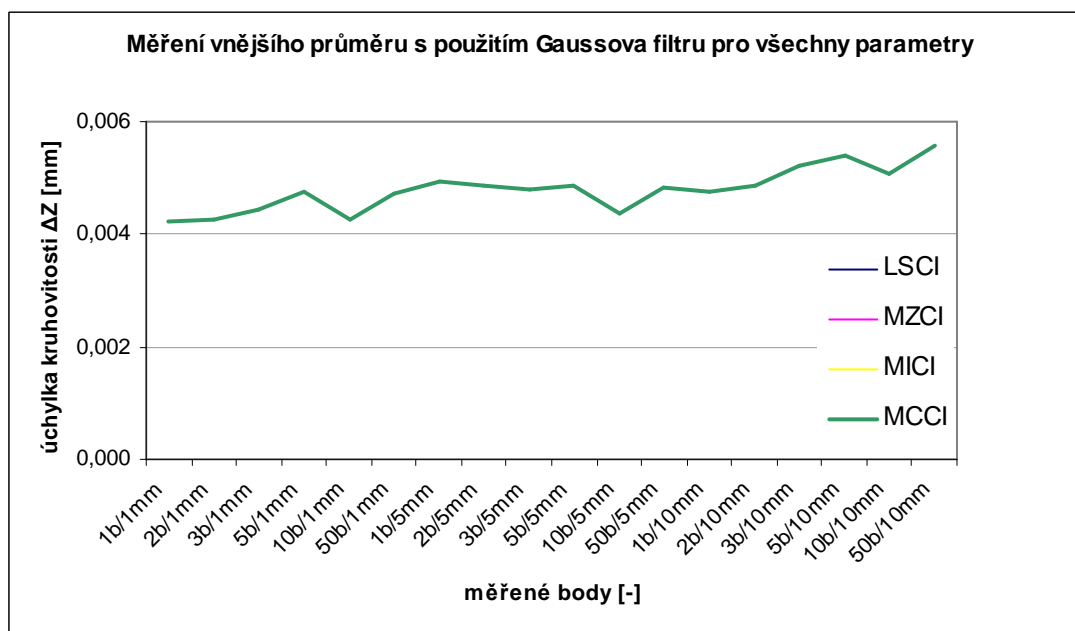
Obr. 26 – Graf závislosti aritmetického průměru úchylky kruhovitosti $\Delta \bar{Z}$ na počtu měřených bodů – MICI



Obr. 27 – Graf závislosti aritmetického průměru úchylky kruhovitosti $\Delta \bar{Z}$ na počtu měřených bodů – MCCI



Obr. 28 – Graf závislosti aritmetického průměru úchylky kruhovitosti $\Delta \bar{Z}$ na počtu měřených bodů pro všechny parametry – vnitřní průměr



Obr. 28 – Graf závislosti aritmetického průměru úchylky kruhovitosti $\Delta \bar{Z}$ na počtu měřených bodů pro všechny parametry – vnější průměr

3.2.4 Zhodnocení měření skenovací metodou

Z grafů závislosti aritmetického průměru naměřených hodnot úchylky kruhovitosti na počtu měřených bodů vyplývá, že hodnota úchylky kruhovitosti je nižší opět u měření vnitřního průměru. Obr. 27 ukazuje, že sledovaný parametr u vnitřního průměru MICI vykazuje ze všech parametrů nejvyšší hodnoty úchylky. Naproti tomu graf na obr. 28 ukazuje, že sledovaný parametr u vnějšího průměru MCCI je totožný s ostatními parametry aritmetických průměrů úchylky kruhovitosti naměřených hodnot. Potom všechny naměřené hodnoty jsou vykresleny v jedné křivce.

3.3 Měření součásti dotykovou metodou na přístroji Hommel Roundscan 435

Měření součásti na přístroji Hommel Roundscan 435 bylo realizováno v Poznani v Polsku - „Instytut Technologii Mechanicznej - Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych“. Součást byla vždy měřena desetkrát a to pro parametry LSCI, MZCI, MICI a MCCI. V prvním případě proběhlo měření bez použití Gaussova filtru a v dalším měření již s použitím Gaussova filtru.

Pro měření byla použita kontaktní sonda o průměru kuličky 1mm.

Tab. 21 - Parametry měřicího stroje Hommel Roundscan 435 [22]

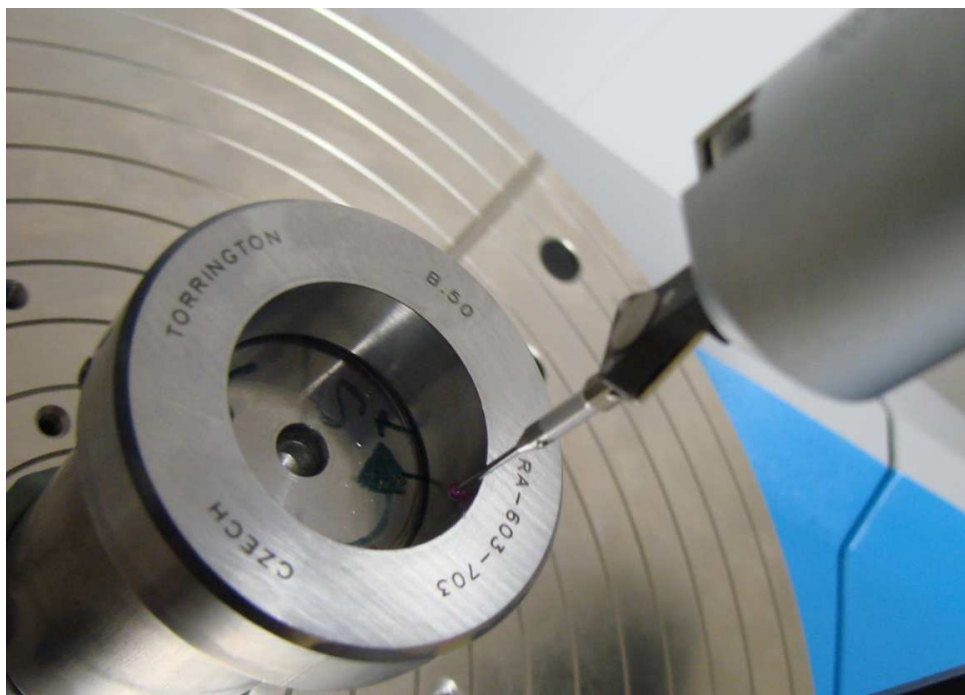
Max. průměr dílce	mm	750 (850)
Max. měřicí průměr	mm	450 (550)
Max. měřicí výška	mm	350
Max. zatížení stolu	kg	60
Rotační měřicí osa (osa C)		
Průměr stolu	mm	330
Úchylka kruhovitosti	μm	0,02
+μm/mm měř.výšky		0,0005
Axiální házivost	μm	0,03
+μm/mm rádiusu		0,0005
Rozsah centrování	mm	± 5
Rozsah nivelace		± 1°
Měřicí rychlost	1/min	0,2 - 30
Vertikální měřicí osa (osa Z)		
Rozsah měření	mm	350
Úchylka přímosti/100	μm	0,15
Paralell C-Z/ měř.dráha	μm	0,5
Horizontální osa (osa R)		
Rozsah měření	mm	245
Úchylka přímosti/100	μm	0,25
Kolmost C-R	μm	0,8



Obr. 30 – Hommel Roundscan 435 [22]

Podmínky měření:

- teplota prostředí: 20°C;
- vyhodnocovací software: Turbo Form V 8.20;
- průměr měřicí kuličky: Φ 1 mm;
- filtr: Gauss;
- parametry kružnic: LSCI, MZCI, MICI, MCCI;
- měřená součást: kroužek.



Obr. 31 – Měřicí přístroj Hommel Roundscan 435

3.3.1 Měření součásti na přístroji Hommel Roundscan 435 – dotyková metoda

Tab. 22 – Naměřené hodnoty pro parametr LSCI s použitím Gaussova filtru

Parametr:	LSCI				Jednotky
Měření:	vnitřní-bez filtru	vnitřní s filtrem	vnější -bez filtru	vnější-s filtrem	
Počet měření v řezu:	10				
Aritmetický průměr ΔZ :	0,003	0,002	0,003	0,001	[mm]
Nejistota uA:	0,000115	0,000009	0,000036	0,000008	[mm]

Tab. 23 – Naměřené hodnoty pro parametr MZCI

Parametr:	MZCI				Jednotky
Počet měřených bodů:	vnitřní-bez filtru	vnitřní s filtrem	vnější -bez filtru	vnější-s filtrem	
Počet měření v řezu:	10				
Aritmetický průměr ΔZ :	0,003	0,002	0,003	0,001	[mm]
Nejistota uA:	0,000075	0,000009	0,000031	0,000008	[mm]

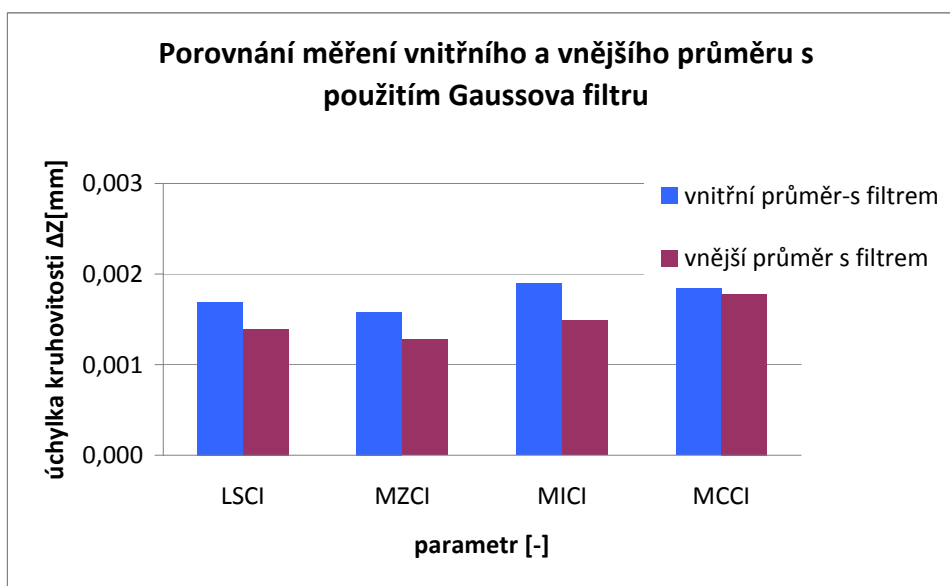
Tab. 24 – Naměřené hodnoty pro parametr MICI

Parametr:	MICI				Jednotky
Počet měřených bodů:	vnitřní-bez filtru	vnitřní s filtrem	vnější -bez filtru	vnější-s filtrem	
Počet měření v řezu:	10				
Aritmetický průměr ΔZ :	0,004	0,002	0,003	0,001	[mm]
Nejistota uA:	0,000118	0,000013	0,000036	0,000020	[mm]

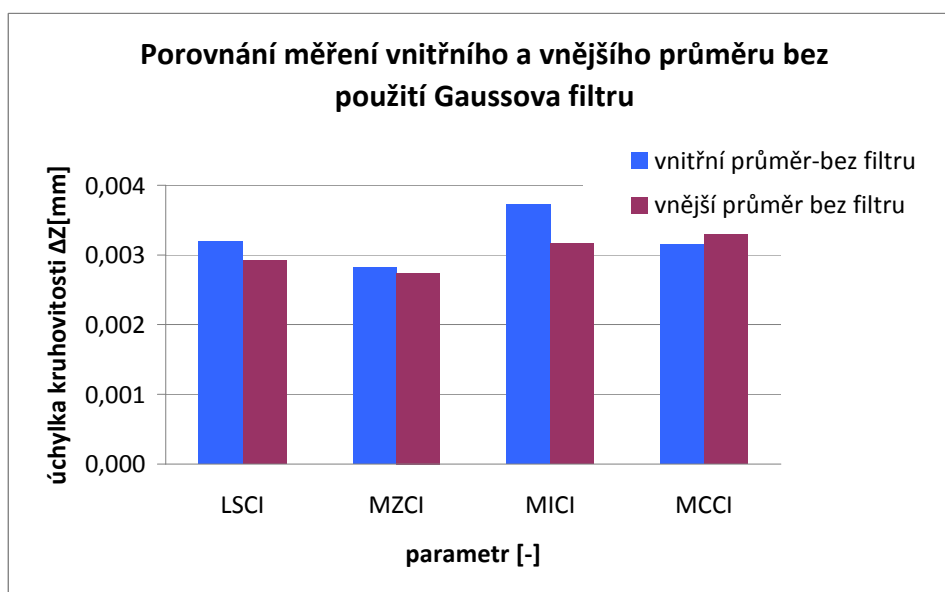
Tab. 25 – Naměřené hodnoty pro parametr MCCI

Parametr:	MCCI				Jednotky
Počet měřených bodů:	vnitřní-bez filtru	vnitřní s filtrem	vnější -bez filtru	vnější-s filtrem	
Počet měření v řezu:	10				
Aritmetický průměr ΔZ :	0,003	0,002	0,003	0,002	[mm]
Nejistota uA:	0,000110	0,000007	0,000073	0,000010	[mm]

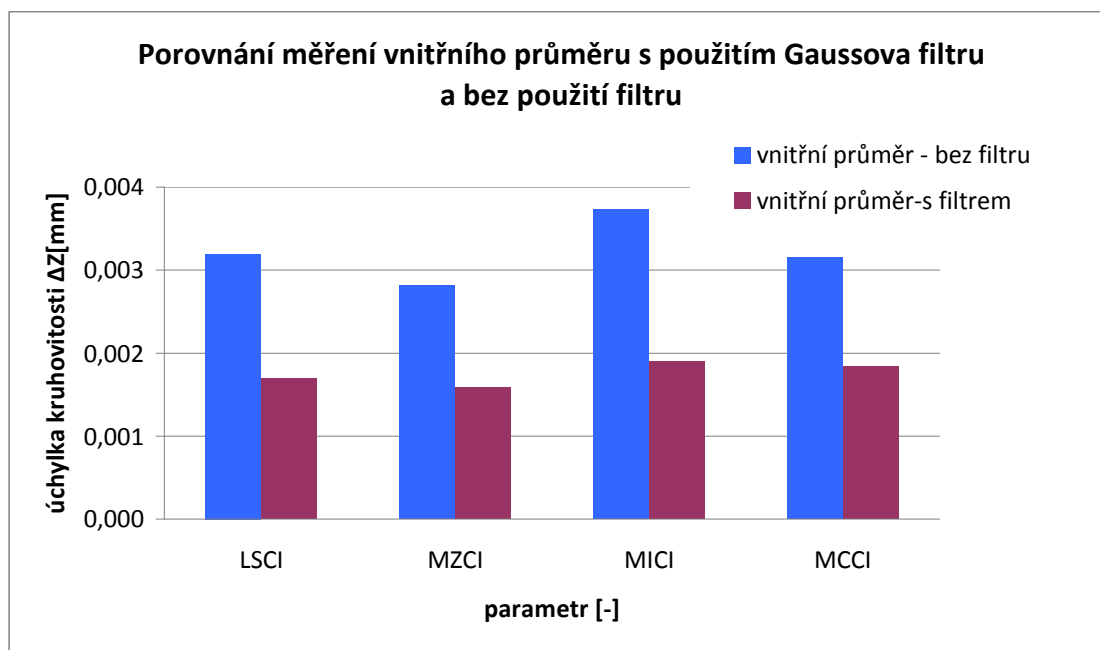
3.3.2 Grafické vyhodnocení měřené součásti na přístroji Hommel Roundscan 435



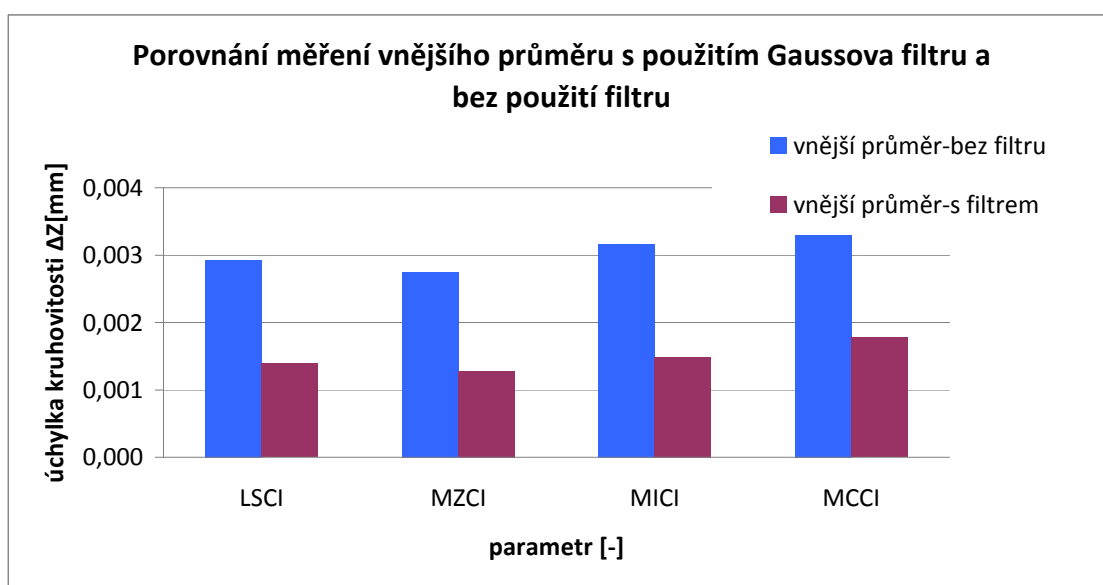
Obr. 32 – Porovnání měření úchylny kruhovitosti vnějšího průměru s vnitřním průměrem s použitím Gaussova filtru



Obr. 33 – Porovnání měření úchylny kruhovitosti vnějšího průměru s vnitřním průměrem bez použití Gaussova filtru



Obr. 34 – Porovnání měření úchyly kruhovitosti vnitřního průměru s použitím Gaussova filtru a bez použití filtru



Obr. 35 – Porovnání měření úchyly kruhovitosti vnějšího průměru s použitím Gaussova filtru a bez použití filtru

3.3.3 Zhodnocení měření dotykovou metodu na přístroji Hommel Roundscan 435

Z naměřených hodnot úchyly kruhovitosti byly vykresleny grafy. Z těchto grafů lze vyčíst, že při měření s použitím Gaussova filtru, jsou hodnoty úchyly kruhovitosti větší u vnitřního průměru. Při měření bez použití Gaussova filtru toto nemůžeme tvrdit. Lze však konstatovat, že hodnoty úchyly kruhovitosti dosahují vyšších hodnot při měření bez použití Gaussova filtru.

Měření s použitím Gaussova filtru je tedy přesnější.

3.4 Měření na optickém přístroji - digitální skener Atos GOM II.

Toto měření bylo opět realizováno v Poznani v Polsku - „Instytut Technologii Mechanicznej - Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych“.

„Digitální skener Atos firmy GOM je založen na principu triangulace, k čemuž využívá stereoefektu dvou snímacích kamer. Měřený díl se položí na stůl nebo upevní do držáku a provede se série záběrů z různých úhlů pohledu. Projektor osvětluje povrch dílu přes vestavěný rastr kontrastními světelnými proužky, jejichž tvar na povrchu součásti je snímán dvěma kamerami. Pomocí optických zobrazovacích rovnic jsou z nich automaticky vypočítány přesné 3D souřadnice jako mrak bodů, který může obsahovat až 4 miliony bodů z jednoho záběru. [12]“



Obr. 36 – Digitální skener Atos II. [17]

3.4.1 Systém měření a vyhodnocování měřených dat u přístroji Atos GOM II.

Snímač polohy – hlava s ATOS senzorem je umístěna volně na stojanu před měřeným objektem. Pro automatizovaná měření je senzor umístěn na robotu [16].

Proces měření

- rychlé měření s vysokou hustotou dat,
- hustota dat je daná použitým zařízením a pohybuje se v rozmezí od 800 000,

- až do 4 000 000 bodů na 1 záběr,
- automatické složení jednotlivých záběrů do jednoho celku je zajištěno pomocí referenčních značek umístěných na objektu nebo mimo něj,
- za účelem naskenování celého objektu lze pohybovat skenerem i měřeným objektem [16].

Vyhodnocení – během několika vteřin systém velmi přesně vyhodnotí 3D souřadnice až čtyř milionu bodů měřeného objektu [14].

Výsledek – každé další měření je automaticky transformován do společného souřadnicového systému. Kompletní sběr dat a výsledky porovnání mohou být exportovány do běžného formátu pro další zpracování [14].

Parametry ATSO Gom II. a podmínky měření

Teplota prostředí	20°C;
počet měřených bodů	1 400 000;
čas měření	1 s;
velikost pracovní plochy	175 x 140 – 200 x 1600 mm ² ;
rozestup bodů	0,12 – 1,4 mm;
rozměry senzoru	490 x 260 x 170 mm ³ [15].

3.4.2 Vyhodnocení naměřených hodnot úchylky kruhovitosti na přístroji Atos GOM II.

Měření součásti na optickém měřicím přístroji Atos GOM II. bylo realizováno na Instytut Technologii Mechanicznej - Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych v Poznani v Polsku. Toto měření je časově velmi náročné, a proto se měření realizovalo jednou.

Naměřené hodnoty úchylky kruhovitosti na Atos GOM II.

Vnitřní průměr pro parametr LSCI: $\Delta Z = 0,0225$ mm

Vnitřní průměr pro parametr MZCI: $\Delta Z = 0,0225$ mm

Vnitřní průměr pro parametr MICI: $\Delta Z = 0,0224$ mm

Vnitřní průměr pro parametr MCCI: $\Delta Z = 0,0224$ mm

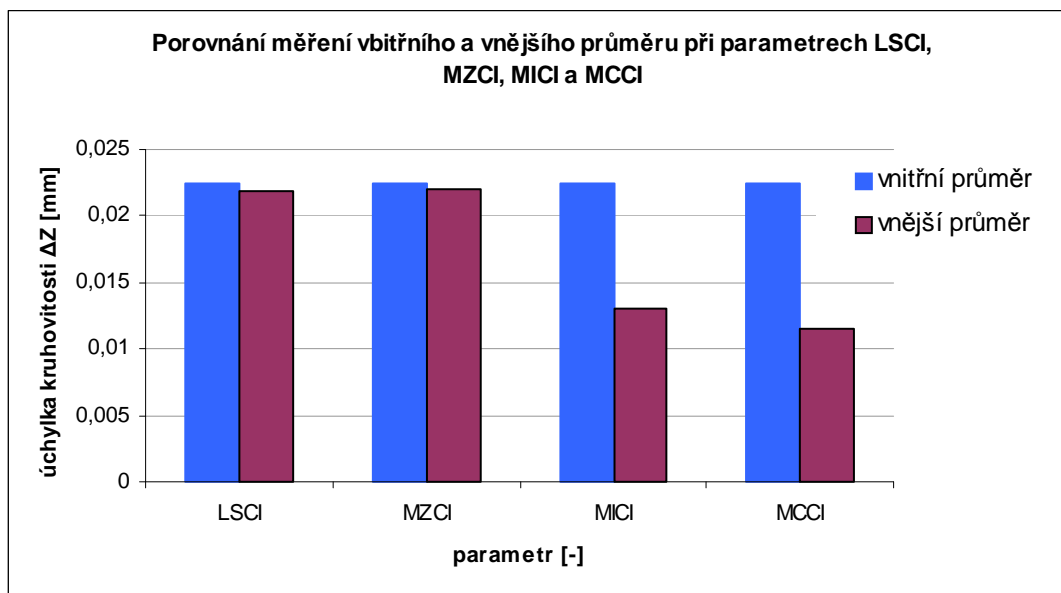
Vnější průměr pro parametr LSCI: $\Delta Z = 0,0219$ mm

Vnější průměr pro parametr MZCI: $\Delta Z = 0,0218$ mm

Vnější průměr pro parametr MICI: $\Delta Z = 0,0218$ mm

Vnější průměr pro parametr MCCI: $\Delta Z = 0,0219$ mm

3.4.3 Grafické vyhodnocení při měření na přístroji Atos GOM II.



Obr. 37 – Grafické porovnání naměřených hodnot úchylky kruhovitosti u měření vnitřního a vnějšího průměru součásti při parametrech LSCI, MZCI, MICI a MCCI

3.4.4 Vyhodnocení měření na optickém přístroji Atos GOM II.

Na základě grafického vyhodnocení lze konstatovat, že naměřené hodnoty úchylky kruhovitosti jsou větší u měření vnitřního průměru součásti s porovnáním měření vnějšího průměru součásti.

Měřené hodnoty úchylky kruhovitosti pomocí přístroje Atos GOM II. jsou v porovnání s měřeními na ostatních přístrojích o řád vyšší. U měření Atos GOM II. je vyžadován povrch kovové součástky matný, aby lesklá plocha nezabránila odrazu paprsku. Tento matný film, který se nanáší na povrch měřené součásti, způsobil nejméně přesné hodnoty úchylky kruhovitosti.

3.5 Měření na optickém přístroji Werth VideoCheck IP

Měření součásti na optickém měřicím přístroji Werth VideoCheck IP bylo realizováno ve firmě PRIMA Bilavčík s.r.o. v Uherském Brodě. Jako senzor posloužil optický senzor zpracování obrazu. Naměřené hodnoty byly zpracovány pomocí softwaru WinWerth. Ukázka toho, jak software pracuje se nachází v příloze.

Z důvodu časové náročnosti měření byly měřeny vnitřní i vnější průměr součásti v množství bodů 32. Každé měření proběhlo desetkrát.



Obr. 38 – Optický měřicí přístroj Werth VideoCheck IP [20]

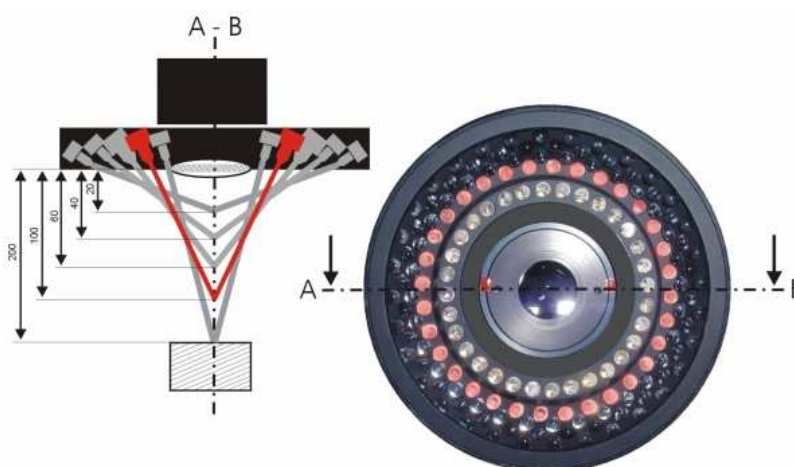
Parametry Werth VideoCheck IP:

Max. možná chyba stroje:	E1: $(2,0 + L/150) \mu\text{m}$	L=měřicí délka v mm
	E2: $(2,5 + L/120) \mu\text{m}$	L=měřicí délka v mm

Platí pro podmínky: teplota $20^{\circ}\text{C} \pm 2\text{K}$ teplotní gradient 1K/h – dle norem ISO 10360 [21].

Osvětlení přístroje Werth VideoCheck IP

Werth MultiRing osvětlení generuje optimální kontrast pro měření z dopadajícího světla [18].



Obr. 39 - Werth MultiRing – unikátní systém osvětlení [18]



Obr. 40 – Příklad měření na přístroji Werth VideoCheck IP

3.5.1 Vyhodnocení naměřených hodnot úchylek kruhovitosti na optickém přístroji Werth VideoCheck IP

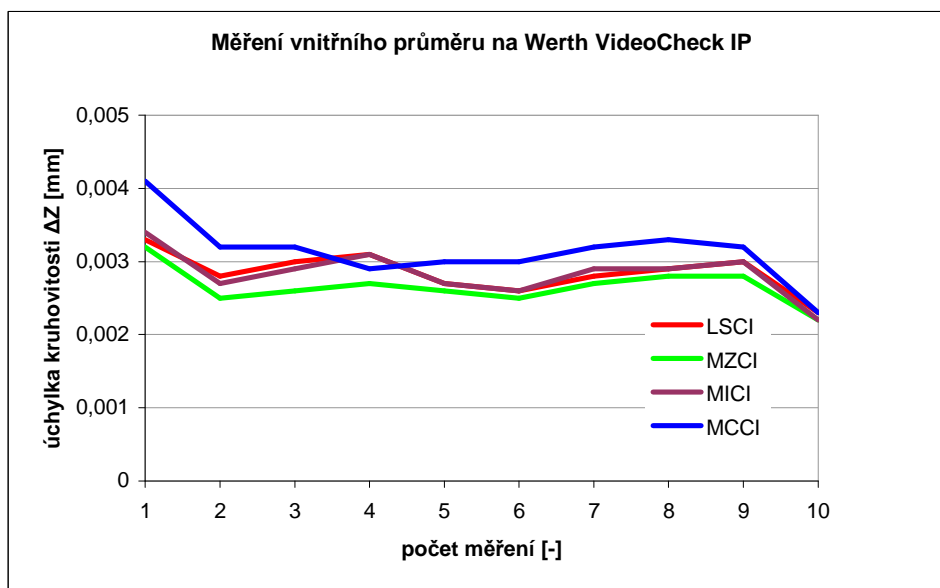
Tab.26 - Naměřené hodnoty úchylky kruhovitosti pro 10 měření 32 bodů na Werth VideoCheck IP – vnitřní průměr

Parametr:	LSCI	MZCI	MICI	MCCI	Jednotky
Aritmetický průměr $\Delta \bar{Z}$:	0,003	0,003	0,003	0,003	[mm]
Nejistota u_A :	0,00008	0,00008	0,00010	0,00013	[mm]

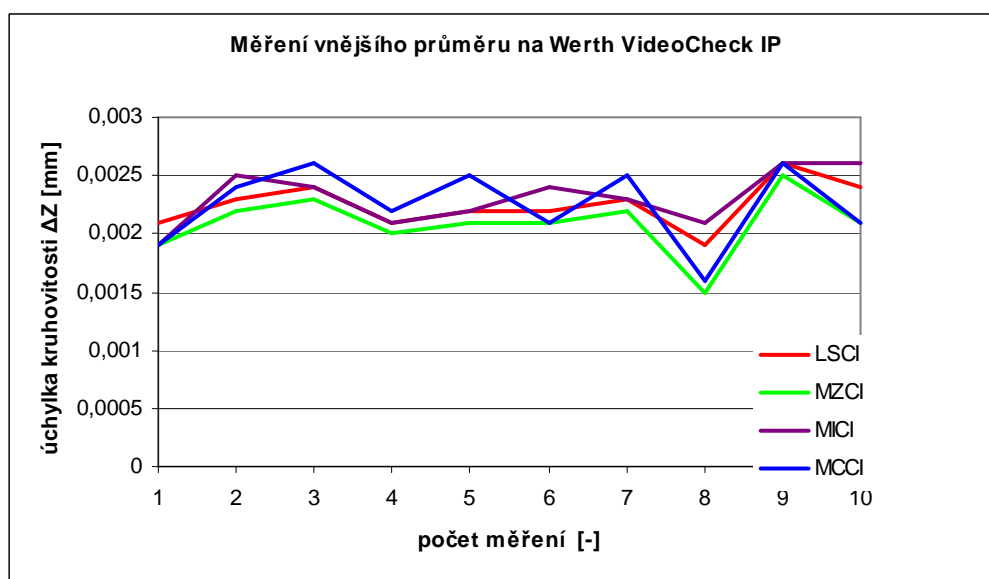
Tab. 27 – Naměřené hodnoty úchylky kruhovitosti pro 10 měření 32 bodů na Werth VideoCheck IP – vnější průměr

Parametr:	LSCI	MZCI	MICI	MCCI	Jednotky
Aritmetický průměr $\Delta \bar{Z}$:	0,002	0,002	0,002	0,002	[mm]
Nejistota u_A :	0,00006	0,000080	0,000070	0,000100	[mm]

3.5.2 Grafické vyhodnocení měřených hodnot úchylek kruhovitosti na optickém přístroji Werth VideoCheck IP



Obr. 41 – Grafické znázornění měření vnitřního průměru na Werth VideoCheck IP



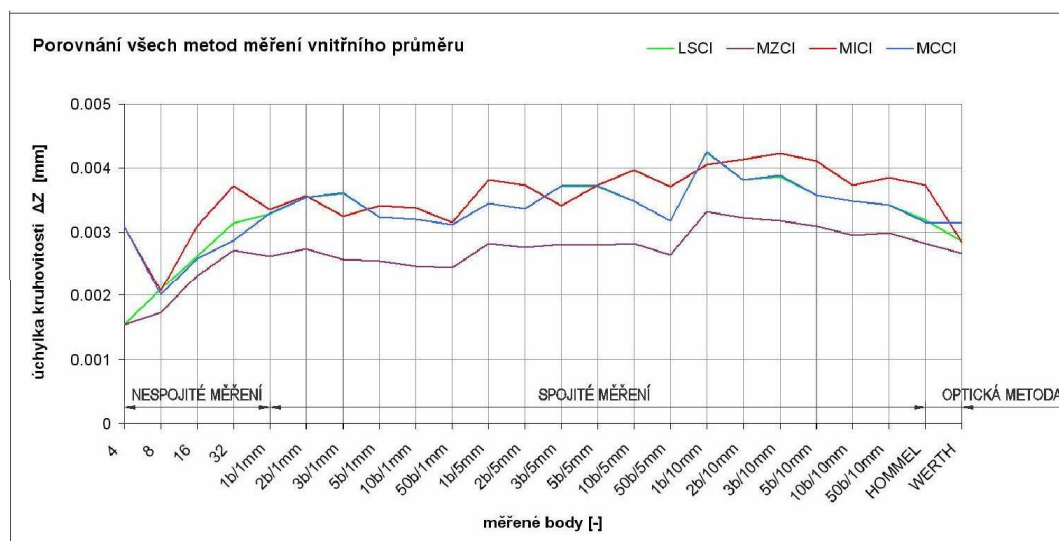
Obr. 42 - Grafické znázornění měření vnějšího průměru na Werth VideoCheck IP

3.5.3 Vyhodnocení naměřených hodnot úchyly kruhovitosti na optickém přístroji Werth VideoCheck IP

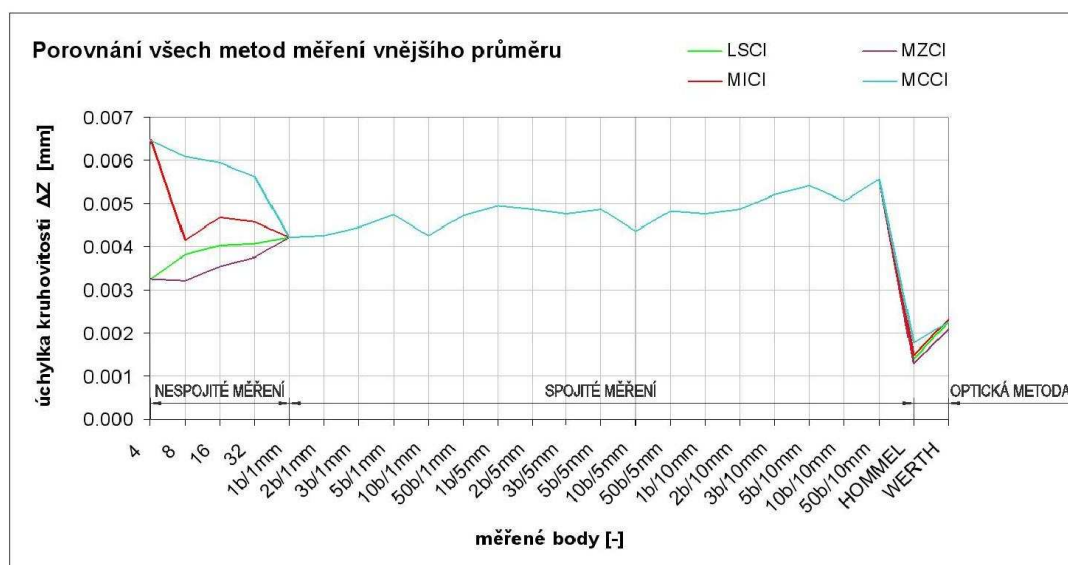
Z měření vnitřního průměru na přístroji Werth VideoCheck IP – 32 bodů vyplývá, že úchylka kruhovitosti se při vnitřním průměru jeví přesnější u parametru MZCI a u vnějšího průměru také MZCI.

4. Vyhodnocení výsledků

Z velkého množství naměřených hodnot na přístrojích dotykových i optických byly vykresleny grafy. Tyto grafy ukazují srovnání všech metod měření na různých měřicích přístrojích a to vždy pro měření vnitřního a vnějšího průměru součásti. Na základě Fourierovy řady vykresleny v grafu jen hodnoty pro měřené body 4, 8, 16 a 32. Ve skutečnosti však byly měřeny všechny body v rozmezí 4 až 32.



Obr. 43 – Grafické znázornění porovnání všech metod měření vnitřního průměru



Obr. 44 – Grafické znázornění porovnání všech metod měření vnějšího průměru

Závěr

Tématem diplomové práce byla analýza měření úchylky kruhovitosti na optickém měřicím zařízení. Úvodní textová část nás seznamuje se současnou problematikou měření kruhovitosti. Jsou zde uvedeny definované odchylky, geometrické tolerance a také pojmy referenčních kružnic.

Další kapitola je věnována tématu úchylka kruhovitosti. Zde jsou popsány parametry hodnocení úchylky kruhovitosti a metody jejího měření. Tato kapitola obsahuje všeobecný přehled a popis při měření dotykovou i optickou metodou. Dále jsou zde zmíněny různé druhy senzorů a měřicích zařízení a jejich ukázky v podobě obrázků. Součástí této kapitoly jsou podmínky přesného měření spolu s chybami a nejistotami měření.

Třetí kapitola je věnována experimentální části. Pro měření úchylky kruhovitosti byl použit vymezovací kroužek o rozměrech $d=3\text{mm}$, $D=57,4\text{mm}$ a tloušťce $10,3\text{mm}$.

V polské Poznani bylo realizováno měření dotykovou metodou na zařízeních Dea Global-IMAGE clima a Hommel Roundscan 435 a optickém přístroji Atos GOM II. Dalším optickým zařízením při experimentálním měření byl souřadnicový měřicí stroj Werth VideoCheck IP firmy PRIMA Bilavčík s.r.o.

U součásti byla měřena vždy úchylka kruhovitosti vnitřního i vnějšího průměru. Každé měření bylo realizováno desetkrát, aby bylo možné vyloučit hrubé chyby a také aby bylo možné statistické zpracování naměřených hodnot.

Při měření dotykovou metodou byla použita měřicí sonda s kuličkou o průměru 1mm . Měření oběma metodami nám umožnilo vzájemné srovnání všech naměřených hodnot. Při měření úchylek kruhovitosti a na základě vykreslených grafů (obr. 42 a 43) lze konstatovat, že k měření úchylky kruhovitosti jsou měřicí souřadnicové stroje vyhovující. Pro metodu měření nespojitou metodou je důležitý počet měřených bodů, průměr součásti, průměr měřicího dotyku a především požadovaná přesnost.

Celá experimentální část se porovnávala s výsledky naměřenými na konvenčním měřicím zařízení Hommel Roundscan 435, jenž je pokládán za nejpřesnější měřicí zařízení. Měření spojitou metodou na tomto zařízení bylo pro nás referenční hodnotou. Počet snímaných bodů při měření Hommel Roundscan 435 činil 3600.

Při porovnání naměřených hodnot úchylky kruhovitosti nespojitě metody s referenční hodnotou (tedy spojitou metodou) lze říci, že při měřených bodech 4 a 8 se toto měření nedá považovat za objektivní. Hodnota úchylky kruhovitosti se začala ustalovat při 32 bodech. Se zvyšujícím se počtem měřených bodů se tvar profilu blíží skutečné hodnotě a úchylka kruhovitosti se blíží referenční hodnotě. Pro nespojitě měření je to však neefektivní způsob, a proto je vhodnější zvolit spojitě měření pomocí skenovací sondy

a jejího dotyku. Z grafů lze vyčíst, že od 1b/1mm (100b) křivka narůstá a ustaluje se při 50b/1mm (5000b), potom opět mírně vzrůstá a při 50b/5mm (5000b) se blíží k referenční hodnotě. Z toho vyplývá, že čím větší počet bodů je měřený spojitou metodou, tím bude úchylka kruhovitosti věrohodnější. Měření více bodů nám tedy dává přesnější výsledky.

Můžeme také konstatovat, že optické souřadnicové měřicí stroje jsou vhodné pro měření úchylky kruhovitosti, které na základě výsledků porovnání s referenční křivkou vykazují při počtu měřených bodů 32 nejlepší výsledky úchylky kruhovitosti. Tyto hodnoty byly naměřeny na optickém multisenzorovém zařízení Werth VideoCheck IP. Z důvodu velké časové náročnosti byl snímám jen počet bodů 32. Na tomto základě můžeme říci, že druhým, pro nás nejpřesnějším zařízením, co se týče přesnosti měření úchylky kruhovitosti, je optický měřicí přístroj Werth VideoCheck IP a třetí je pak přístroj DEA Global-IMAGE clima.

Na zařízení Atos GOM II. byly naměřeny úchylky kruhovitosti o jeden řád vyšší, což zkresluje výsledky ostatních měřených hodnot v závěrečném grafu, a proto hodnoty Atos GOM II. nejsou v grafu zahrnuty. Zároveň lze konstatovat, že měření úchylky kruhovitosti bylo nejméně přesné na tomto přístroji z důvodu naneseného matného filmu na měřené součásti, který výsledky měření ovlivnil.

Seznam použité literatury:

- [1] TICHÁ, Š.: *Strojírenská metrologie*. Ostrava, VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2006. 112 s. ISBN 80 – 248 – 0671 – 1
- [2] www.fbi.vsb.cz [online]. 2007 [cit. 2009-05-12]. VŠB-TU OSTRAVA, Fakulta bezpečnostního inženýrství. Dostupné z WWW: <<http://www.fbi.vsb.cz/shared/uploadedfiles/fbi/presnost.pdf>>.
- [3] *Geometrické požadavky na výrobky (GPS)-Kruhovitost-Část 1: Slovník a parametry kruhovitosti; ČSN P ISO/TS 12181-1, duben 2005*, vydal: Český normalizační institut, Praha, 2005, Vytiskl: XEROX CR, s.r.o., 16 s.
- [4] Pernikář Jiří, Tykal Miroslav, Vačkář Josef, *Jakost a metrologie, Část: metrologie*, AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM Brno, s.r.o., 2001, ISBN 80-214-1997-0
- [5] Adamczak, S., *Pomiary geometryczne powierzchni – zarysy kształtu falistości i chropowatości*; wydawnictwa Naukowo – Techniczne; ISBN: 978-83-204-3526-9; 2008
- [6] www.mmspektrum.cz [online]. 2007 [cit. 2009-06-12]. *Optimalizace měření kruhovitosti povrchu*. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/optimalizace-mereni-kruhovitosti-povrchu>
- [7] Očenášová, L.: *Príspevok k hodnoteniu odchýlky kruhovitosti pri meraní na súradnicovom meracom stroji: dizertačná práca*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, Strojnická fakulta, Katedra obrábania a automatizácie, 2008, 101 s.
- [8] Christoph, R., Neumann, H.J., *Multisenzorová souřadnicová měřicí technika*; publikováno firmou PRIMA Bilavčík, s.r.o.; L.V.Print, Uherské Hradiště, 2008, 106 s.
- [9] www.fsid.cvut.cz [online]. [cit. 2009-15-12]. NEJISTOTY MĚŘENÍ. Dostupné z: <http://www.fsid.cvut.cz/tem/nejistoty/nejistoty1.pdf>
- [10] Krsek, A., Osanna H.P., Kuric, I., Prostředník, D., *Strojárska metrológia a riadenie kvality*, Slovenská technická univerzita v Bratislave, 1998, vydavateľstvo STU, Bratislava ISBN: 80-227-1025-3, 290 s.
- [11] www.mmspektrum.com [online]. 2009 [cit. 2010-15-01]. *Prostorová charakteristika textury povrchu*. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prostorova-charakteristika-textury-povrchu>
- [12] www.mmspektrum.com [online]. 2008 [cit. 2010-15-01]. *Optický skener v průmyslové praxi*. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/opticky-skener-v-prumyslove-praxi>

- [13] www.technicalmuseum.cz [online]. [cit. 2010-17-01]. Dostupné z:
<http://www.technicalmuseum.cz/images/files/MCK/3DSEMINAR2009/juranek.pdf>
- [14] www.gom.com [online]. [cit. 2010-01-03]. *Industrial 3D Measurement Techniques*. Dostupné z:
<http://www.gom.com/EN/measuring.systems/atos/system/workflow.html>
- [15] www.gom.com [online]. [cit. 2010-01-03]. *Industrial 3D Measurement Techniques*. Dostupné z:
<http://www.gom.com/EN/measuring.systems/atos/system/variations/atos.ii.html>
- [16] www.mcae.cz [online]. [cit. 2010-10-02]. Dostupné z:
http://www.mcae.cz/3d_digitalizace_a_mereni_CS.html
- [17] www.indiamart.com [online]. [cit. 2010-12-02]. Dostupné z:
<http://www.indiamart.com/apmtechnologies/white-light-scanning-systems.html>
- [18] www.werth.de [online]. [cit. 2010-22-02]. Dostupné z:
http://www.werth.de/en_gb/unser-angebot/products/sensors-accessories/werth-multiring.html
- [19] www.plastikht.cz [online]. [cit. 2010-22-02]. Dostupné z:
<http://www.plastikht.cz/kontrolakvalitynastrojarna.html>
- [20] www.merici-pristroje.cz [online]. [cit. 2010-02-03]. *Souřadnicové stroje*. Dostupné z:
<http://www.merici-pristroje.cz/souradnicove.php?txt=319&lg=CZ>
- [21] www.werth.de [online]. [cit. 2010-22-02]. Dostupné z:
<http://www.werth.de/de/unser-angebot/produkte-nach-kategorie/koordinatenmessgeraete/fuer-fertigung-und-messraum/werth-videocheck-ip-250400.html>
- [22] www.hommel-etamic.cz[online]. [cit. 2010-02-04]. Dostupné z:
http://www.hommel-etamic.cz/cz/kat_list.asp?CV=384
- [23] Telúch, O.: *Meranie odchýlky kruhovitosti spojitou a nespojitou metódou: diplomová práca*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilíně, Strojnická fakulta, Katedra obrábania a automatizácie, 2008, 68 s.

Seznam příloh

PŘÍLOHA 1 - MĚŘENÍ SKENOVACÍ METODOU BEZ POUŽITÍ GAUSSOVA FILTRU	2
PŘÍLOHA 2 – UKÁZKA PŘÍSTROJE HOMMEL ROUNDSCAN 435	6
PŘÍLOHA 3 – UKÁZKA WERTVIDEOCHECK IP	7
PŘÍLOHA 4 – UKÁZKA MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ ATOS GOM II.	8
PŘÍLOHA 5 - DATOVÝ NOSIČ - CD	

Poděkování

Chtěla bych poděkovat vedoucí mé diplomové práce Ing. Lence Čepové, PhD. za podnětné rady a odborné vedení při zpracování diplomové práce. Rovněž chci poděkovat pracovníkům Institutu Technologii Mechanicznej-Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych a firmě PRIMA Bilavčík s.r.o. za pomoc při realizaci experimentálního měření.